

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra automatizační techniky a řízení

Laboratorní modul pro sestavení RLC obvodu

Laboratory module for assembly of RLC circuit

Student:

Miloslav Bečka

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jolana Škutová, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Miloslav Bečka**
Studijní program: B3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906R006 Mechatronické systémy
Téma: **Laboratorní modul pro sestavení RLC obvodu**
Laboratory Module for Assembly of RLC Circuit
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s měřením frekvenčních charakteristik RLC obvodů pro vybrané typy zapojení.
2. Navrhněte a vytvořte laboratorní modul pro měření frekvenčních charakteristik RLC obvodů.
3. Vytvořte uživatelskou aplikaci v prostředí Control Web.
4. Proveďte testování funkčnosti laboratorního modulu pro zvolené typy RLC obvodu.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte směry dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

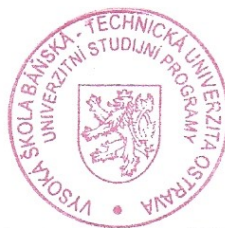
KEESMAN, Karel J. *System identification: an introduction*. New York: Springer, c2011. Advanced textbooks in control and signal processing. ISBN 978-0-85729-521-7.
NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
TESAŘ, Zdeněk a Iva PETŘÍKOVÁ. *Základy elektroniky, součástky a obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. [CD-ROM] Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Os-trava, 2014. ISBN 978-80-248-3628-7.
VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. *Základy automatické regulace*. Dotisk 2. vyd. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-1924-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jolana Škutová, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019





doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.
vedoucí katedry



Ing. Zdeňka Chmelíková, Ph.D.
prorektorka pro studium

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Miloslav Bečka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nošovice 121

Nošovice, okr. Frýdek-Místek

739 51

Poděkování

Rád bych zde vyjádřil poděkování své vedoucí bakalářské práce Ing. Jolaně Škutové, Ph.D., za věcné rady, užitečné připomínky, a hlavně trpělivost spolu s ochotou v průběhu tvorby této práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Jaromíru Škutovi, Ph.D., za pomoc při realizaci laboratorního modulu.

ANOTACE

Bečka, M. Laboratorní modul pro sestavení RLC obvodu: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, Mechatronika, Katedra automatizační techniky a řízení, 2019. Vedoucí práce: Škutová, J.

Práce se zabývá realizací a návrhem laboratorního modelu pro měření kmitočtových charakteristik RLC obvodů, kterého při správné funkčnosti může být posléze vyrobeno více kusů s cílem následného využití ve výuce. Stávající měřicí model stavebnice RC Didactic je k dispozici pouze v omezeném množství.

Práce popisuje typové úlohy RLC obvodů a jejich analytickou identifikaci. Dále se zabývá návrhem, realizací a testováním měřicího obvodu. Jelikož je motivací následná výroba kopií těchto modulů, uvádí se zde schémata zapojení a podrobný pracovní postup spolu s výrobou desek plošných spojů. Obsluha měřicího modulu je řešena pomocí uživatelské aplikace vytvořené v programovém prostředí Control Web. Naměřená data je možné importovat do programu MATLAB, kde v rámci výuky identifikace systémů proběhne jejich parametrizace vybranou metodou.

Klíčová slova: MATLAB, Control Web, kmitočtová charakteristika, laboratorní modul, zpracování dat, RLC obvod, RC Didactic

ANNOTATION

Bečka, M. Laboratory module for assembly of RLC circuit: bachelor thesis. Ostrava VŠB – Technical University of Ostrava, University Study Programmes, Mechatronics, Department of Control Systems and Instrumentation, 2019. Thesis head: Škutová, J.

The work deals with the implementation and design of a laboratory model for measuring the frequency characteristics of RLC circuits which, in the case of proper functionality, can then be produced in higher number of pieces with the aim of subsequent use in teaching. The existing RC Didactic kit is only available in limited quantities.

The thesis describes the type tasks of RLC circuits and their analytical identification. Further it deals with design, realization and testing of measuring circuit. Since the subsequent production of copies of these modules is a motivation, there are circuit diagrams, a detailed workflow along with the production of printed circuit boards. The operation of the measuring module is solved by means of a user application created in the Control Web environment. The measured data can be imported into the MATLAB program, where they are parameterized by the selected method within the system identification teaching.

Keywords: MATLAB, Control Web, frequency characteristics, laboratory module, data processing, RLC circuit, RC Didactic

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Úvod	10
1 Měření kmitočtových charakteristik RLC obvodů	11
1.1 Matematické modely	11
1.2 Kmitočtový přenos	11
1.3 Vyhodnocení bodů kmitočtové charakteristiky	12
1.4 Typové úlohy pro měření kmitočtových charakteristik	14
2 Stavebnice RC Didactic	19
2.1 Moduly výukového systému rc2000 – μ Lab	19
2.1.1 Modul „Analog & Digital Data Unit“	19
2.1.2 Funkční generátor a modul pro zapojení komponentů	21
2.2 Měření laboratorní úlohy na stavebnici RC Didactic	21
2.2.1 Zadání úloh	22
2.2.2 Zpracování dílčích částí zadání	23
3 Návrh vlastní struktury laboratorního modulu	27
3.1 Desky plošných spojů	27
3.2 Seznam součástek	29
3.3 Realizace elektronické části měřicího modulu	30
4 Komunikační rozhraní	33
4.1 Vnitřní sériová linka	33
4.2 Univerzální synchronní a asynchronní rozhraní pro přenos dat	34
5 Programový systém Control Web	36
6 Software MikroC PRO for PIC	39
7 Funkce mikrokontroléru a uživatelská aplikace	41
7.1 Algoritmus	41
7.2 Měření v uživatelské aplikaci	42
7.3 Testování měřicího modulu	43
8 Závěr	46
Seznam použité literatury	48

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	analogově digitální převodník (Analog/Digital),
DC	stejnosměrný proud (Direct Current),
DPS	deska plošných spojů,
FG	funkční generátor,
I ² C	vnitřní sériová linka (Inter-Integrated Circuit),
PC	osobní počítač (Personal Computer),
USB	univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus),
USART	univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter),
a_i	koeficienty mnohočlenu ve jmenovateli přenosu,
$A(\omega)$	modul kmitočtového přenosu,
b_i	koeficienty mnohočlenu v čitateli přenosu,
f_z	zlomová frekvence,
$G_s(s)$	L-přenos systému,
$G(j\omega)$	kmitočtový přenos,
k_i	koeficient přenosu (zisk), zesílení, tlumení,
m	stupeň mnohočlenu v čitateli přenosu,
n	stupeň mnohočlenu ve jmenovateli přenosu,
$P(\omega)$	reálná část kmitočtové charakteristiky,
$Q(\omega)$	imaginární část kmitočtové charakteristiky,
s	komplexní proměnná,
t_φ	časový posun,

T_0	časová konstanta,
u	akční veličina,
$U_i(s)$	obraz napětí,
y	regulovaná veličina,
$Z_i(s)$	obraz impedance,
ω	úhlový kmitočet [s^{-1}],
ω_k	kritický úhlový kmitočet,
φ	fáze kmitočtového přenosu,
ξ	koefficient relativního (poměrného) tlumení.

Úvod

Za nedílnou součást syntézy regulačních obvodů se považuje identifikace systému. Skládá se ze dvou základních částí, a to z analytické nebo experimentální identifikace. Při výuce se prakticky zkoušejí postupy identifikace s následným získáváním dat v časté podobě odezvy na skokové, případně harmonické signály, které jsou ve výsledném tvaru odezvy přechodových charakteristik či výstupů potřebných k určení kmitočtových charakteristik. Tyto postupy nejsou bez úskalí, je tedy vhodné se na ně v rámci výuky náležitě připravit. V oblasti experimentální identifikace se studenti dále seznamují s aplikací jejích metod. Analytická metoda se v tomto případě použije pro lepší rozdělení frekvencí vstupního signálu v kritické části kmitočtové charakteristiky tzn. oblasti zlomové frekvence.

Cílem bude příprava nového modulu pro měření na elektrických obvodech, kde výsledná data budou poté využívána studenty navazujícího studia Katedry automatizační techniky a řízení. Tento modul by jim měl pomoci více prohloubit nabyté vědomosti v analýze přenosů, ve vyhodnocování naměřených dat, s parametrizací, s porovnáním kvality měření a v práci s programem MATLAB.

Realizované moduly budou využity v oblasti kmitočtových charakteristik předmětu Identifikace a simulace systémů za účelem získávání dat. Jejich použití může být také užitečné pro záměry ostatních předmětů, semestrálních nebo i vědeckých prací.

1 Měření kmitočtových charakteristik RLC obvodů

Záměrem fyzikálního modelování spolu se specifikací systému je přinést přesný popis systému, jak jen to dovoluje jeho návrh a následná analýza. Nutnost k nalezení modelu systému je volba typu matematického modelu, díky němu dojde k vyvození parametrů pro konkrétní reálný systém. Výsledek vybrané metody experimentální identifikace pro elektrické obvody s pasivními součástkami je ve tvaru kmitočtového přenosu, který je jedním z možných matematických modelů popisu systému.

Identifikací se rozumí proces určení reálného systému, jeho matematického vzoru, struktury či parametrů. Rozděluje se podle implementace procesu identifikace na analytickou a experimentální. Analytická identifikace na rozdíl od experimentální vyžaduje především znalost systému ve formě fyzikálních zákonitostí, dále není problém docílit vytvoření modelu pro neexistující systém, opakovaná platnost modelu u jiných typů procesů je také výhodou. Experimentální identifikaci zpravidla použijeme tehdy, pokud chování systému není možné popsat matematicky nebo nám analytická identifikace neposkytuje požadovaný model s dostatečnou přesností [1, 2].

1.1 Matematické modely

Najít odpovídající popis fyzikální situace pro reálné procesy, pomocí matematických modelů, je významným krokem v aplikaci teorie systémů, která definuje algebraické vztahy mezi veličinami ovlivňující systém. Jedním z matematických modelů v kmitočtové oblasti je kmitočtový přenos. Další matematické oblasti jsou definovány v oblasti komplexní proměnné nebo v časové oblasti. Následující část se tedy bude zabývat jen matematickým modelem v kmitočtové oblasti.

1.2 Kmitočtový přenos

Vlastnosti identifikovaného systému v kmitočtové oblasti vyjadřuje matematický model nazvaný kmitočtový přenos. Grafickou podobou kmitočtového přenosu je kmitočtová charakteristika. Obecný tvar kmitočtového přenosu je dán vztahem:

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega), \quad (1)$$

kde $P(\omega)$ je reálná část a $Q(\omega)$ imaginární část kmitočtového přenosu [1, 2]. Pak jsou tyto dvě části vyjádřeny parametricky:

$$P(\omega) = \operatorname{Re}G(j\omega) = \frac{a_0b_0 + b_1\omega^2}{a_0^2 + \omega^2} \quad (2)$$

$$Q(\omega) = \operatorname{Im} G(j\omega) = \frac{(a_0 b_1 - b_0)\omega}{a_0^2 + \omega^2} \quad (3)$$

Důležitou vlastností matematického modelu, která vyjadřuje skutečnou existenci lineárního dynamického členu, je fyzikální realizovatelnost. Není možné, aby před změnou vstupní veličiny vznikla odezva na výstupu dynamického členu. Odtud plyne podmínka fyzikální realizovatelnosti [2]:

$$n > m \rightarrow \text{podmínka je silná,} \quad (4)$$

$$n = m \rightarrow \text{podmínka je slabá.} \quad (5)$$

V případě, že platí podmínka:

$$n < m, \quad (6)$$

potom tato podmínka fyzikální realizovatelnosti není platná, tudíž ani matematický model nemůže popisovat skutečný dynamický člen. V případě fyzikální realizovatelnosti u kmitočtového přenosu platí, že:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} G(j\omega) = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} A(\omega) = 0 \quad (8)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} L(\omega) = -\infty \quad (9)$$

a to je silná podmínka fyzikální realizovatelnosti [2].

Podmínky fyzikální realizovatelnosti jsou důležité u posouzení platnosti získaného modelu metodou experimentální identifikace, neboť některé metodické postupy se zabývají určením řádu polynomů přenosu a konkrétních parametrů, ale neřeší podmínku fyzikální realizovatelnosti.

1.3 Vyhodnocení bodů kmitočtové charakteristiky

Na základě několika bodů kmitočtových charakteristik získáme jednou z metod identifikace žádané parametry kmitočtového přenosu a tím pádem i matematický model v našem případě měřeného RLC elektrického obvodu. Vyhodnocení probíhá při měření na systému pro daný vstupní harmonický signál s předem danou amplitudou a frekvencí a se získanou odezvou na vstupní harmonický signál, což je signál výstupní.

Vstupní sinusový signál:

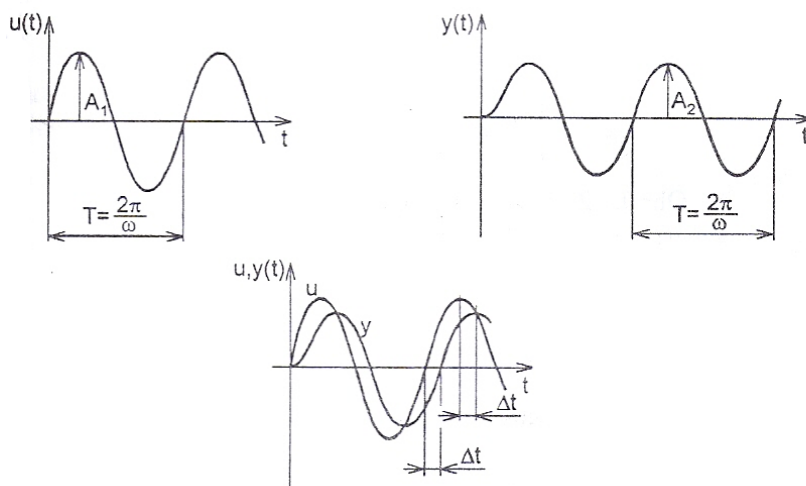
$$u(t) = A_1 \sin(\omega t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) \quad (10)$$

představuje signál vstupního napětí elektrického obvodu s amplitudou A_1 a frekvencí f_1 .

Výstupem elektrického obvodu, který se skládá dle zapojení z napětí na rezistoru, cívce nebo kondenzátoru, dosáhneme harmonického signálu ve tvaru:

$$y(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi) = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi) \quad (11)$$

s amplitudou A_2 , frekvencí f_2 a fázovým posunem φ . Fázový posun vzniká setrvačností dynamického systému a je tedy různý pro odlišné frekvence vstupního signálu. Na rozdíl od vstupního signálu u , který má konstantní amplitudu a frekvenci, signál výstupní má amplitudu nekonstantní, protože se harmonický signál v průběhu času mění.



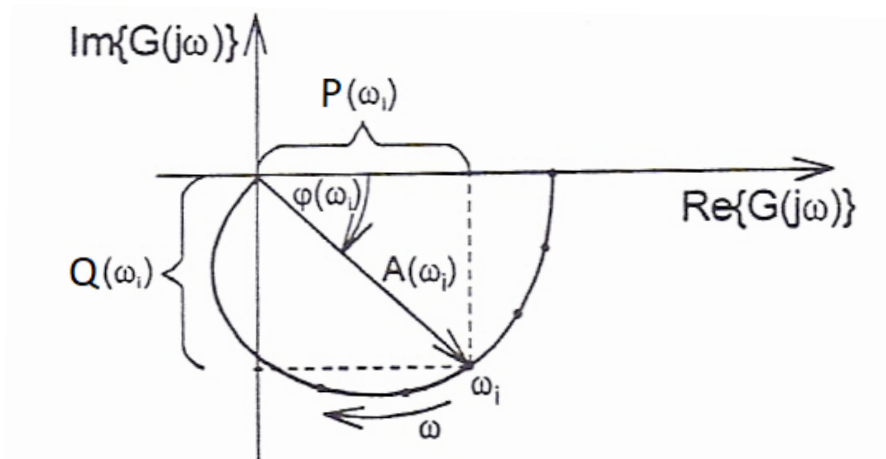
Obr. 1 – Vstupní a výstupní harmonické signály [1]

Pro stanovení jednoho bodu kmitočtové charakteristiky je nezbytně nutné odečíst výše uvedené parametry ze vstupního a výstupního vektoru sinusového signálu, případně jejich rozdílu v časové ose dané posunutím výstupního signálu vůči vstupnímu. Modul kmitočtového přenosu určíme jako poměr amplitud výstupního a vstupního harmonického signálu (12).

$$A(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{A_2}{A_1} \quad (12)$$

Z časového posunutí Δt a frekvence vstupního sinusového signálu f_1 je určena hodnota fázového posunu $\varphi(\omega)$ ve vztahu:

$$\varphi(\omega) = \frac{2\pi}{T} \Delta t = \omega \Delta t = 2\pi f \Delta t \quad (13)$$



Obr. 2 – Kmitočtová charakteristika s experimentálně vyšetřenými body v komplexní rovině [1]

Stanovením modulu, fáze a úhlové frekvence dané frekvencí vstupního signálu je možné vyjádřit reálnou a imaginární složku kmitočtového přenosu, které jsou v následujících rovnicích dané v goniometrickém tvaru:

$$G(j\omega_i) = P(\omega_i) + jQ(\omega_i) = A(\omega_i)\{\cos[\varphi(\omega_i)] + j \sin[\varphi(\omega_i)]\} \quad (14)$$

$$P(\omega_i) = A(\omega_i) \cos[\varphi(\omega_i)] \quad (15)$$

$$Q(\omega_i) = A(\omega_i) \sin[\varphi(\omega_i)] \quad (16)$$

pro úhlovou frekvenci ve vzorcích $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Pak pro zobrazení logaritmických kmitočtových charakteristik, respektive pro zobrazení amplitudové logaritmické kmitočtové charakteristiky je nutné určit také logaritmickou amplitudu $L(\omega)$ dle vztahu:

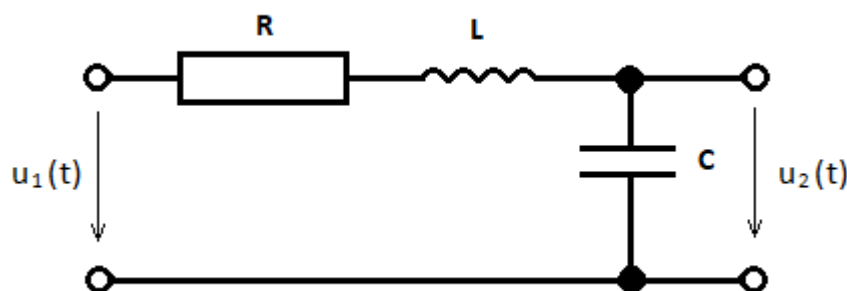
$$L(\omega) = 20 \cdot \log A(\omega) \quad (17)$$

a sestojit jednotlivé body kmitočtové charakteristiky stanovené z měření na systému [1].

1.4 Typové úlohy pro měření kmitočtových charakteristik

Uvedený rozbor níže obsahuje vzhled možných schémat typových RLC obvodů s odvozením matematických modelů ve tvaru obrazových přenosů. Tyto obvody byly navrženy pro studenty k bližší definici zadání systému, na němž si v rámci experimentální metody identifikace mohou vyzkoušet měření kmitočtových charakteristik. Prováděné měření má studenty vést ke znalostem ve zpracování měření kmitočtových charakteristik a porovnání vypočítaných hodnot s těmi analytickými. Analytické hodnoty již znají, jelikož mají zapojení RLC obvodu a tím je jim známý také typ systému a jeho obrazový přenos.

Úloha I – RLC obvod s výstupním napětím na kondenzátoru



Obr. 3 – Schéma prvního obvodu

Pro daný RLC obvod je obrazový přenos dán podílem výstupního a vstupního napětí ze známého vztahu pro dělič napětí a konkrétními prvky v elektronickém obvodu takto

$$G_s(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{\frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs} + Ls} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}. \quad (18)$$

Z obrazového přenosu lze vyvodit, že se jedná o proporcionální systém se setrvačností 2. řádu. Dosazením za $R = 100 \, \Omega$, $C = 1 \, \mu\text{F}$, $L = 1 \, \text{H}$ do vztahu (18) je dán obrazový přenos, konkrétně

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi_0 s + 1} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-6} s^2 + 100 \cdot 10^{-6} s + 1} = \frac{1}{0,000001 s^2 + 0,0001 s + 1}, \quad (19)$$

za splnění podmínky fyzikální realizovatelnosti

$$n > m \rightarrow \text{podmínka je silná.} \quad (20)$$

Porovnáním obecného tvaru kmitavého členu s číselnými hodnotami získanými analytickou identifikací, pak známe základní parametry, kterými je časová konstanta

$$T_0 = \sqrt{0,000001} = 0,001 \, \text{s}, \quad (21)$$

a koeficient poměrného tlumení

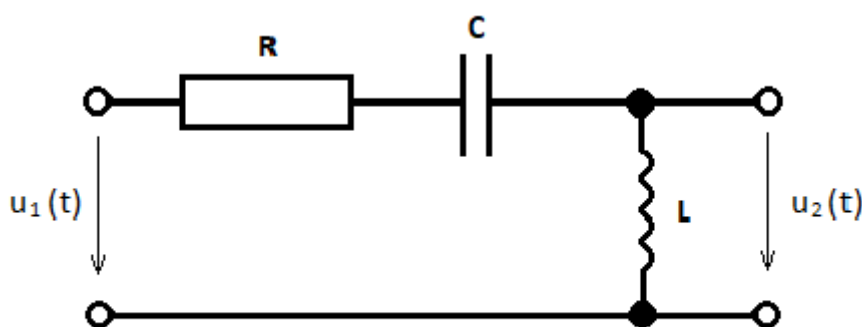
$$\xi_0 = \frac{0,0001}{2 \cdot T_0} = 0,05. \quad (22)$$

Výpočet zlomové frekvence:

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_z \rightarrow f_z = \frac{1}{2\pi T_0} \cong 159 \, \text{Hz} \quad (23)$$

Pomocí zlomové frekvence (bod zlomu kmitočtové charakteristiky) lze zjistit místo, které určuje změnu amplitudy. Tudíž se na tuto okolnost při měření nesmí zapomenout a musí se upravit počet měřených vzorků frekvencí kolem této zlomové frekvence tak, aby nedošlo ke zkreslení bodů (či tvaru) kmitočtové charakteristiky, což by následně vedlo k chybné parametrizaci u experimentální identifikace.

Úloha II – RLC obvod s výstupním napětím na cívce



Obr. 4 – Schéma druhého obvodu

Postup bude prakticky stejný jako u předchozí úlohy. Začneme odvozením přenosu výše uvedeného obvodu.

$$G_s(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{Ls}{R + \frac{1}{Cs} + Ls} = \frac{LCs^2}{LCs^2 + RCs + 1}, \quad (24)$$

a dle tvaru obrazového přenosu tak vyplývá, že se jedná o derivační systém se setrvačností 2. řádu. Po dosazení hodnot $R = 100 \, \Omega$, $C = 1 \, \mu\text{F}$, $L = 1 \, \text{H}$ je dán konkrétní číselný tvar přenosu

$$G_s(s) = \frac{T_D s^2}{T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi_0 s + 1} = \frac{s^2}{s^2 + 100s + 10^6} = \frac{10^{-6} s^2}{10^{-6} s^2 + 10^{-4} s + 1}, \quad (25)$$

a v tomto případě se slabou podmínkou fyzikální realizovatelnosti

$$n = m \rightarrow \text{podmínka je slabá.} \quad (26)$$

Porovnáním obecného tvaru kmitavého členu s číselnými hodnotami získanými analytickou identifikací, lze dostat základní parametry, kterými je časová konstanta

$$T_0 = \sqrt{0,000001} = 0,001 \, \text{s}, \quad (27)$$

a koeficient poměrného tlumení

$$\xi_0 = \frac{0,0001}{2 \cdot T_0} = 0,05. \quad (28)$$

Výpočet zlomové frekvence:

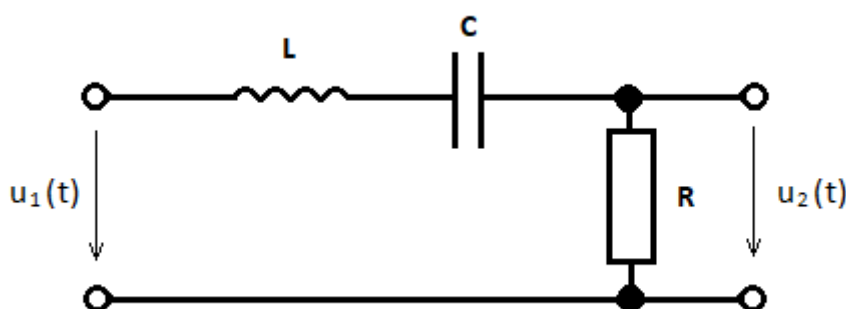
$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_z \rightarrow f_z = \frac{1}{2\pi T_0} \cong 159 \text{ Hz} \quad (29)$$

a derivační časovou konstantou

$$T_D = 0,000001 \text{ s.}$$

Porovnáním úlohy I a úlohy II, kde kondenzátor a cívka jsou dány se stejnou parametrickou hodnotou, je možné usuzovat, že časová konstanta setrvačnosti a koeficient poměrného tlumení závisí pouze na hodnotách těchto elektrických prvků, protože v úloze I i úloze II jsou tyto veličiny shodné bez závislosti na typu zapojení.

Úloha III – RLC obvod s výstupním napětím na rezistoru



Obr. 5 – Schéma třetího obvodu

Dle zapojení elektrického obvodu (viz Obr. 5) a s využitím známých vztahů děliče napětí lze stanovit přenos systému

$$G_s(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{R}{R + \frac{1}{Cs} + Ls} = \frac{RCs}{LCs^2 + RCs + 1}. \quad (30)$$

Dosazení hodnot $R = 500 \, \Omega$, $C = 100 \, \text{nF}$, $L = 1 \, \text{H}$ do vztahu (30) je přenos upřesněn

$$G_s(s) = \frac{k_1 s}{T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi_0 s + 1} = \frac{500 \cdot 100 \cdot 10^{-9} s}{1 \cdot 100 \cdot 10^{-9} s^2 + 500 \cdot 100 \cdot 10^{-9} s + 1} = \frac{5 \cdot 10^{-5} s}{10^{-7} s^2 + 5 \cdot 10^{-5} s + 1}, \quad (31)$$

a se splněnou podmínkou fyzikální realizovatelnosti

$$n > m \rightarrow \text{podmínka je silná.} \quad (32)$$

Parametry systému dané analytickou identifikací jsou časová konstanta setrvačnosti

$$T_0 = \sqrt{0,0000001} \approx 3,16228 \cdot 10^{-4} \text{ s}, \quad (33)$$

a koeficient poměrného tlumení

$$\xi_0 = \frac{0,00005}{2 \cdot T_0} = 0,0791, \quad (34)$$

které se liší od úloh I a II díky vyšší hodnotě kapacity kondenzátoru. Indukčnost cívky je ve všech úlohách ve stejné hodnotě, a to z důvodu pouze jediné cívky jako elektronické součástky dostupné u stavebnice RC Didactic.

A také hodnota zlomové frekvence se vlivem změny velikosti kapacity mění dle následujícího výpočtu

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_z \rightarrow f_z = \frac{1}{2\pi T_0} \cong 503 \text{ Hz}. \quad (35)$$

Variace úloh v praktické výuce lze měnit vybranými velikostmi odporu a kapacity tak, aby bylo dosaženo individuálních zadání řešených úloh.

2 Stavebnice RC Didactic

Před samotným návrhem vlastního modulu pro měření kmitočtových charakteristik, který má být náhradou za určité komponenty stávající stavebnice RC Didactic, bylo nejprve nutné se s touto stavebnicí seznámit. Dalším krokem je tedy obecný popis softwaru a částí stavebnice, které byly doposud používány pro měření kmitočtových charakteristik.

2.1 Moduly výukového systému rc2000 – μ Lab

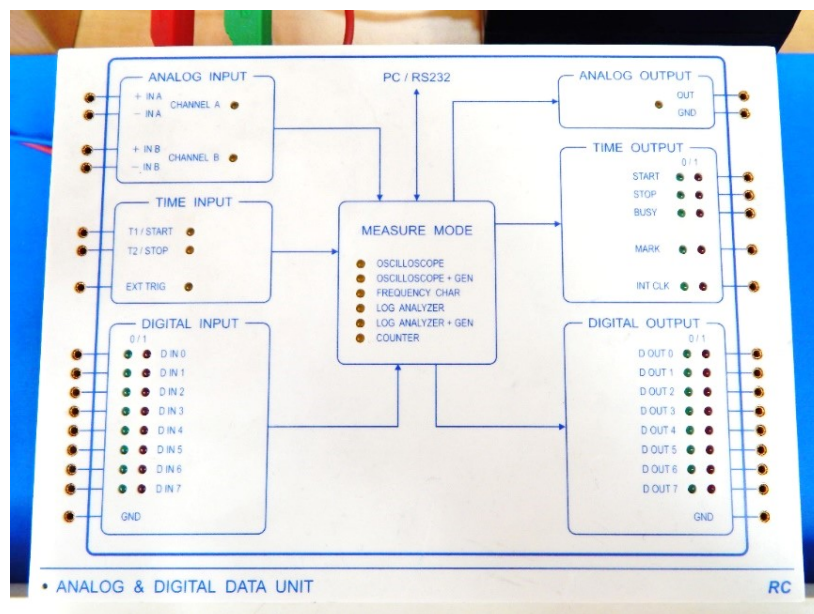
Stávající řešení úlohy, ve které se měří kmitočtové charakteristiky zadaných RLC obvodů, je realizováno modulovým výukovým systémem rc 2000 – μ Lab.

2.1.1 Modul „Analog & Digital Data Unit“

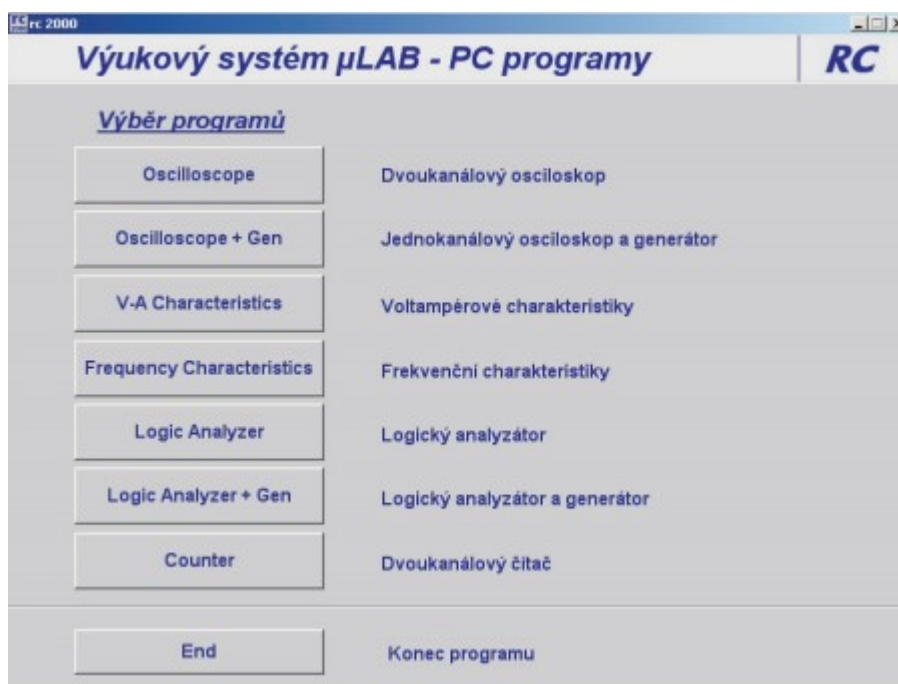
Připojením přes USB k PC modul umožňuje v programu rc 2000 měřit a generovat analogové, případně číslicové signály. Modul obsahuje dva diferenciální analogové vstupy a analogovým výstupem generuje průběh zvolený uživatelem. Samozřejmostí je nastavení volitelných měření s ukládáním a zobrazením naměřených dat rovnou v aplikaci na PC [3].

Módy, volitelné v softwarovém prostředí:

- Osciloskop (diferenciální napět'ové měření)
- Osciloskop s generátorem (jednokanálové)
- Volt-ampérové charakteristiky
- Kmitočtové charakteristiky
- Logický analyzátor
- Logický analyzátor s generátorem
- Čítač



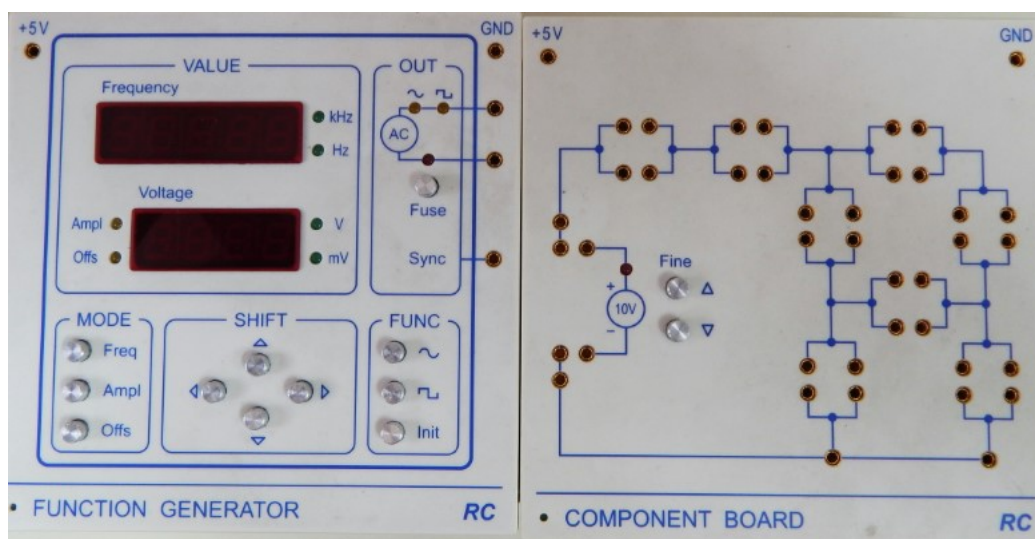
Obr. 6 – Měřicí jednotka



Obr. 7 – Software „rc 2000“ pro podporu stavebnice RC Didactic

2.1.2 Funkční generátor a modul pro zapojení komponentů

Bez generátoru funkcí by vyhodnocování kmitočtových charakteristik nejspíše nebylo možné. Na Obr. 8 vlevo je zobrazen využívaný programovatelný generátor sinusového, obdélníkového nebo trojúhelníkového napětí s pojistkou proti přetížení a přírůstkovou změnou všech parametrů. Pro připojení R, L, C prvků se využije propojovací pole, zobrazené také na Obr. 8 vpravo. Výhodou jsou spoje rozložené k snadné kombinaci paralelního i sériového zapojení komponentů, krokovou změnu napětí o velikosti kroku 0,4 mV, případně referenční zdroj 10 V DC [3].



Obr. 8 – Generátor funkcí (nalevo) a Modul prvků (napravo)

Na modulu „Function Generator“ se pomocí tlačítek v dolní části nastavuje hodnota frekvence vstupního signálu. Nastavení amplitudy vstupního signálu je nutné volit dle uvážení tak, aby vyhodnocení poměru amplitud bylo co nejpřesnější.

2.2 Měření laboratorní úlohy na stavebnici RC Didactic

Cílem úloh měření v laboratoři je seznámení studentů se získáváním měřených dat, vyhodnocováním bodů kmitočtových charakteristik a také následnou parametrizací experimentální metodou identifikace. Současně jsou studenti obohaceni o praktické zkušenosti s modulovou stavebnicí, s níž se v laboratoři setkají i v dalších předmětech studia, softwarovou podporou a importem dat do prostředí MS Excel, vyhodnocování dat zároveň s experimentální identifikací poté probíhá v produktu MATLAB.

2.2.1 Zadání úloh

Následující body stanoví nejen zadaný postup při vypracování dílčích částí, ale také vymezují doporučené podmínky vedoucí ke správnému řešení. Seznam bodů zadání je uveden níže:

- a. Určete obrazový přenos pro zadaný typ RLC obvodu a podle kmitočtových charakteristik odpovídajících získanému obrazovému přenosu navrhnete rozsah frekvencí pro měření RLC obvodu na stavebnici RC Didactic.
- b. Zapojte dle schématu a individuálních parametrů RLC obvod na stavebnici RC Didactic. Proveďte měření vstupně/výstupních signálů pro jednotlivé frekvence a data uložte do SOUBORU TXT.
- c. Vyhodnoťte získané signály za účelem zjištění amplitudy a posunutí neboli fáze RLC obvodu.
- d. Vyhodnocení dat se doporučuje zpracovat v programu MATLAB.
- e. Do souboru MAT uložte získané hodnoty: frekvence, úhlové frekvence, amplitudy, čas posunutí signálu u a y , φ [°].
- f. Aplikujte metodu pro vyhodnocení kmitočtových charakteristik ze cvičení za účelem získání obrazového přenosu z naměřených dat.
- g. Vykreslete získané body kmitočtových charakteristik ze souborů naměřených dat, průběh simulačních kmitočtových charakteristik z obrazového přenosu dle bodu **a**), průběh aproximovaných kmitočtových charakteristik získaných metodou dle bodu **g**).
- h. Vykreslete přechodovou charakteristiku z obrazového přenosu dle bodu **a**) a dále také přechodovou charakteristiku z obrazového přenosu získaného z naměřených dat s využitím funkce STEP.
- i. Porovnejte parametry obrazových přenosů, zejména zesílení k , časovou konstantu T_0 a parametr ζ , zhodnoťte kvalitu měření a přesnost vyhodnocení dat reálné a simulační soustavy RLC obvodu.

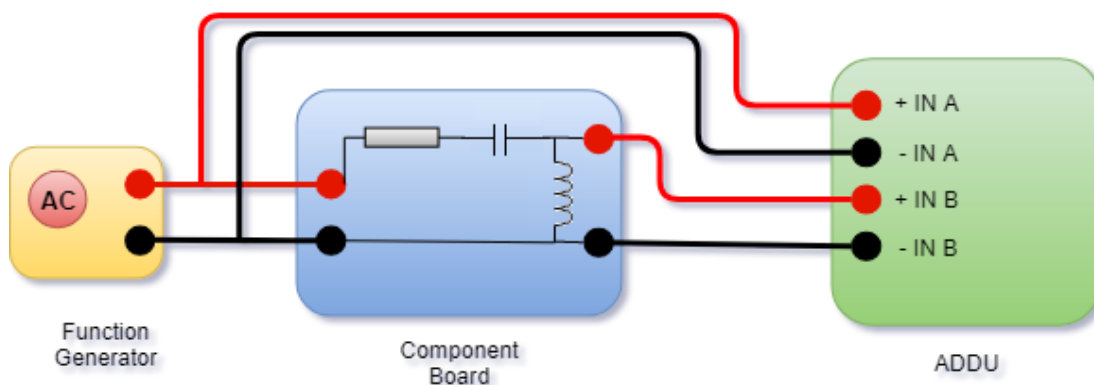
2.2.2 Zpracování dílčích částí zadání

V rámci bakalářské práce, kdy mám navrhnout vlastní elektronický modul pro získávání měřených dat elektrických obvodů pro potřeby výuky, je vhodné, abych prakticky testoval určité kroky dle zadání. Vlastní zkušenosti a testování všech dílčích částí zadání mi pomohou správně navrhnout vlastní modul, který bude v důležitých bodech použitelný jako stavebnice RC Didactic. K dispozici je pouze ve vybraných učebnách a v nedostačujícím množství (pouze 2 stavebnice a jen 1 modul s cívkou).

Zpracování bodu a)

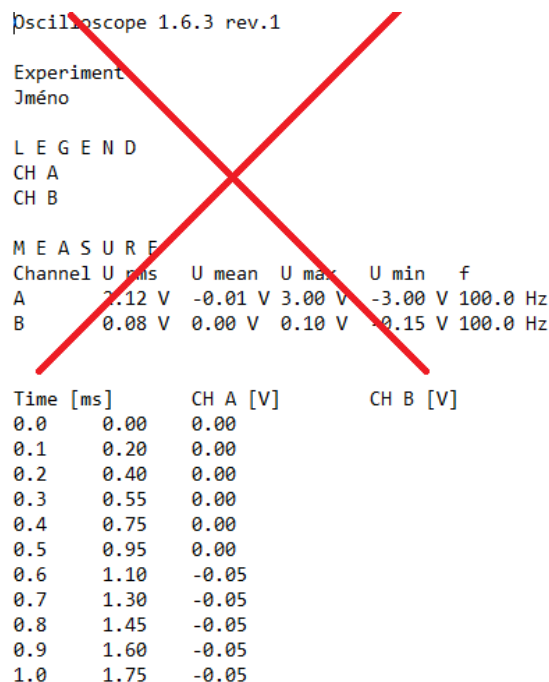
Pro analýzu měřeného obvodu, byla vybrána typová úloha II, ta je zpracována v kapitole 1.4.

Zpracování bodu b)



Obr. 9 – Schéma propojení částí RC Didactic vybrané úlohy

Úkolem je, zapojit zadané součástky a periférie stavebnice RC Didactic dle schématu na Obr. 9. Pokud je vše zdárně připojeno, stačí jen spustit na PC program rc 2000 a kliknout na tlačítko s označením Oscilloscope. Nyní je možno zahájit měření, minimálně však pro třicet různých frekvencí kmitočtové charakteristiky. Výsledkem je soubor s příponou TXT, v němž se objeví zapsané hodnoty vstupního a výstupního signálu za určený čas (viz Obr. 10).



```

Oscilloscope 1.6.3 rev.1

Experiment
Jméno

L E G E N D
CH A
CH B

M E A S U R E
Channel U rms  U mean  U max  U min  f
A      2.12 V  -0.01 V  3.00 V  -3.00 V 100.0 Hz
B      0.08 V   0.00 V   0.10 V  -0.15 V 100.0 Hz

Time [ms]      CH A [V]      CH B [V]
0.0      0.00      0.00
0.1      0.20      0.00
0.2      0.40      0.00
0.3      0.55      0.00
0.4      0.75      0.00
0.5      0.95      0.00
0.6      1.10     -0.05
0.7      1.30     -0.05
0.8      1.45     -0.05
0.9      1.60     -0.05
1.0      1.75     -0.05

```

Obr. 10 – Datový soubor dvou uložených kanálů při frekvenci 100 Hz

Zpracování bodu c)

Hodnoty ze souboru na Obr. 10 se musejí upravit pro další využití v programu Simulink. Nejprve se odstraní záhlaví (vyznačeno červeným křížem), poté převedeme soubor TXT na XLSX, ten již umí program MATLAB zpracovat a pomocí příkazů:

A = xlsread('NazevSouboru.xlsx', 1) → načtení dat

plot(A(:, 1), A(:, 2), 'r', A(:, 1), A(:, 3), 'k') → zobrazení dat

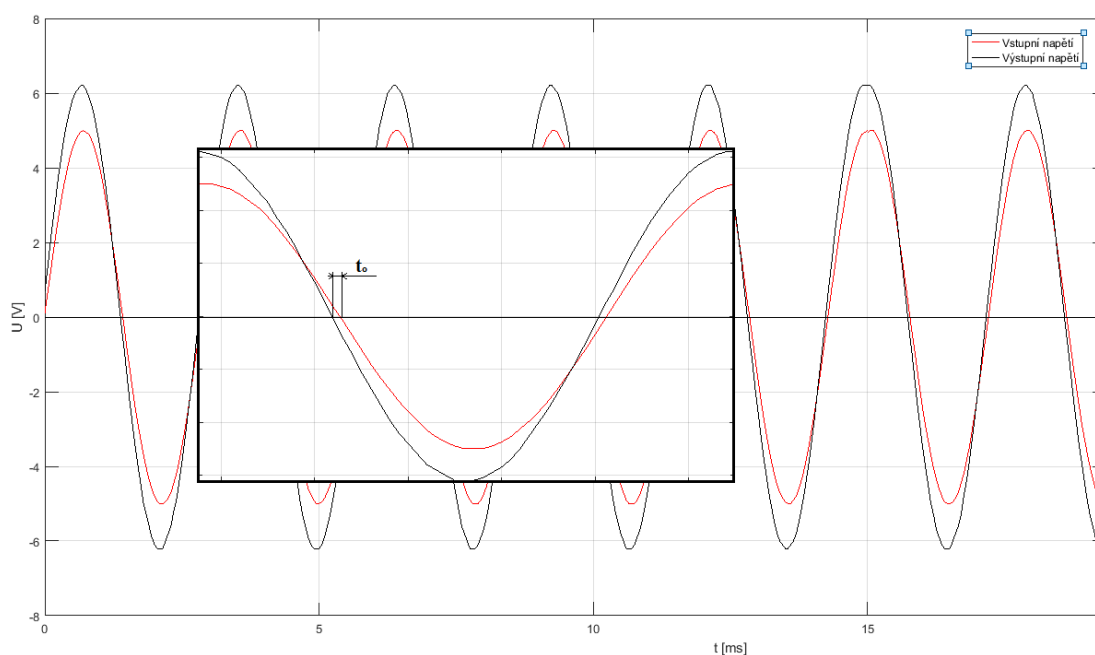
Po vykreslení Grafu 1 už nebrání nic tomu stanovit hodnoty pro zobrazení kmitočtových charakteristik a následně také pro experimentální identifikaci jako vstupní parametry dané metody. Student musí určit dané veličiny dle následujících vztahů:

Úhlový kmitočet → $\omega = 2\pi f$

Fáze → $\varphi = 2\pi f t_\varphi$

Časový posun → t_φ

Rozdíl amplitud vstupního i výstupního signálu → $A(\omega)$



Graf 1 – Vstup a výstup ve tvaru sinusového signálu pro konkrétní frekvenci zobrazený v prostředí programu MATLAB

Tab. 1 – Doporučené členění výsledných dat měření (ukázka)

f [Hz]	ω [s^{-1}]	$A(\omega)$	t_{ϕ} [s]	ϕ [$^{\circ}$]
60	376,99	0,6	$3 \cdot 10^{-4}$	6,48
.
.
.
100	628,32	2,2	$4,53 \cdot 10^{-4}$	163,08
.
.
.
250	1570,80	4,7	$-1,18 \cdot 10^{-4}$	-10,62
.
.
.

Zpracování bodu d)

Naměřená data se vyhodnocují v programu MATLAB, jelikož jeho vykreslování grafů je o hodně přesnější než v Excelu, který nemá příliš dobrou grafickou podporu zobrazování dat, kde při odečítání hodnot mezi jednotlivými vzorky může dojít k nepřítis přesnému vyhodnocení amplitud nebo časového posunu.

Zpracování bodu e)

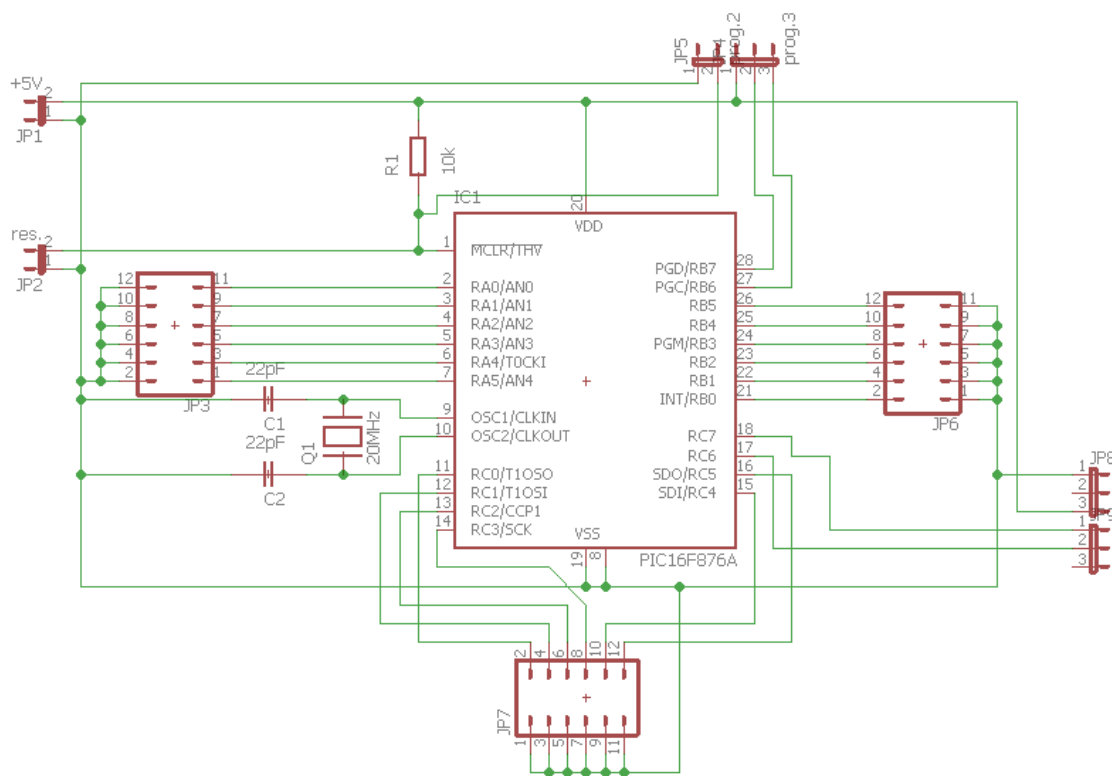
Data získaná měřením a importována do prostředí programu MATLAB je vhodné uložit do datových souborů pomocí funkce: **load NazevSouboru.mat**. Pokud bude práce na vyhodnocení pokračovat v jiném čase a na odlišném počítači, tak uložení dat do souboru je mezikrokem před aplikací metody experimentální identifikace.

3 Návrh vlastní struktury laboratorního modulu

Ve svém návrhu jsem se držel již zmíněné stavebnice RC Didactic a zakomponoval její nejdůležitější součásti i do mé práce. Potřeboval jsem tedy generátor funkcí, pro vytvoření sinusového signálu. Výpočetní jednotku, která bude mít analogové vstupy, neboť budu měřit napětí na vstupu a výstupu z obvodu. Dalším prvkem muselo být konfigurovatelné pole, které představuje konkrétní zapojení RLC obvodu. Finálním bodem se stala EEPROM na ukládání naměřených dat, z důvodu nekompatibility programu MATLAB při reálném měření a uložení naměřených dat.

3.1 Desky plošných spojů

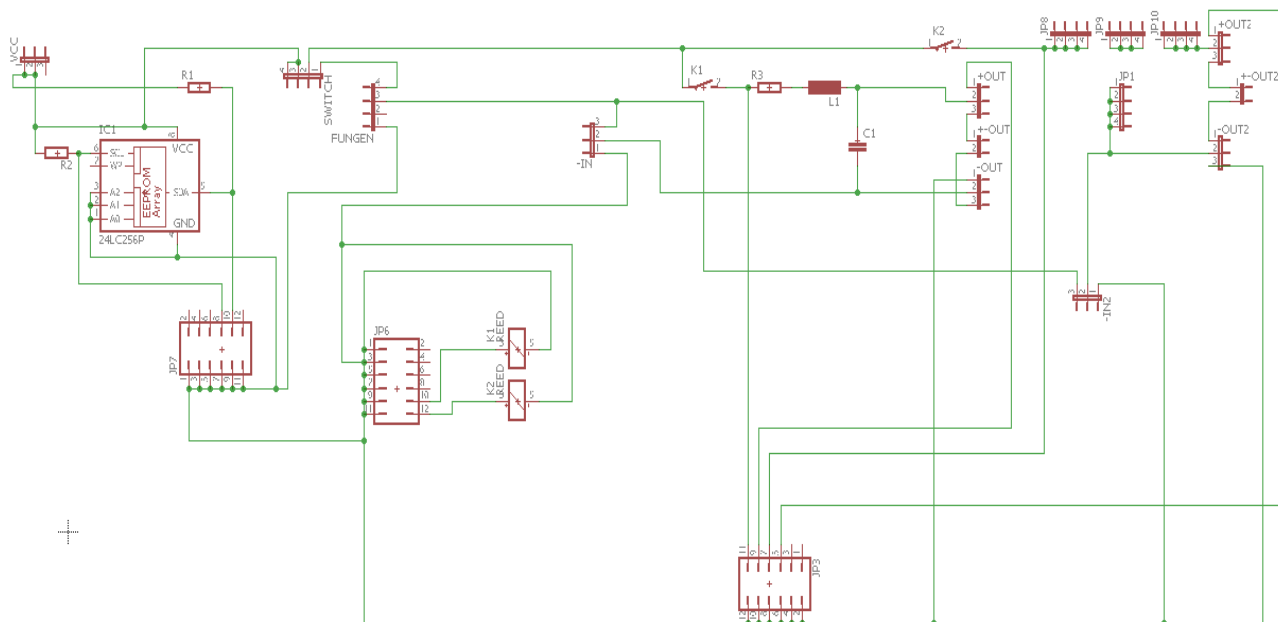
Nejprve jsem provedl návrh nákresu zapojení desky mikrokontroléru a k realizaci návrhu byl využit program Eagle 7.7.0. Základním prvkem celého řetězce je mikrokontrolér PIC16F876A od firmy Microchip. Dutinková lišta s označením JP5 a JP4 v horní části schématu slouží pro prvotní naprogramování mikrokontroléru, další v pořadí JP3, JP6 a JP7 jsou prakticky piny vstupně/výstupních portů A, B, C. Port A se navíc dá přepnout na pět vstupních kanálů A/D modulu. JP2 je připraven jako reset, který se využívá pokaždé, po nahrání programového souboru do mikrokontroléru, popis lze nalézt v kapitole 6. Dutinkové lišty napravo JP9 a JP8 jsou zde připraveny pro využití USART modulu pro komunikaci s PC.



Obr. 11 – Zapojení DPS pro mikrokontrolér

RLC obvod je napojen na analogové vstupy mikrokontroléru, ty budou číst hodnoty vstupního a výstupního napětí. Digitální výstupy budou použity k ovládání relé pro sepnutí obvodu.

Přídavná DPS je modulární, s možností výběru mezi pevně daným (testovacím) obvodem nebo zcela konfigurovatelným. Parametry a zapojení záleží na zadání daného měření. Pro zapojení generátoru funkcí, či konstantního napětí 5 V rovnou z desky mikrokontroléru, se pro tento případ využívá jumper SWITCH viditelný na Obr. 12 v levé horní části. Spojením pinů 1 a 2 zkratovacími propojkami se aktivuje vstup pro FG, piny 2 a 3 zase vstup 5 V. Navíc bylo uvažováno nad možností měření obvodu separátním osciloskopem nebo nediferenciální měření s využitím mikrokontroléru. Při diferenciálním (2 - kanálovém) měření je nutné propojit dalšími zkratovacími propojkami -IN; +OUT; -OUT; piny 2 a 3, výstupní napětí je na pinech +-OUT obdobně i u druhého obvodu -IN2; +OUT2; -OUT2. Pro měření pomocí mikrokontroléru stačí zkratovacími propojkami spojit piny 1 a 2 na -IN; +OUT; -OUT; případně -IN2; +OUT2; -OUT2; pokud je měření prováděno na druhém obvodu. Zadané pasivní prvky odpor, cívku, či kondenzátor lze zapojit do připravených dutinkových lišt JP8, JP9, JP10 a JP1. Prvky označené K1 a K2 reprezentují relé spínací buď první, či druhý obvod.



Obr. 12 – Zapojení rozšiřující DPS

3.2 Seznam součástek

Případné vytvoření kopií obou desek by se neobešlo bez potřebných součástek zaručující správnou funkčnost všech komponent. Seznam součástek je tedy nedílnou součástí této práce. V tabulce Tab.2 lze nalézt celkový souhrn součástek potřebných k vytvoření desky s mikrokontrolérem. Pro rozšiřující desku jsou součástky vypsány v Tab. 3.

Tab. 2 – Použité součástky pro desku mikrokontroléru

Součást	Katalogové jméno	Počet kusů
Programovací port	Dutinková lišta BTK25G	1
Porty mikrokontroléru (A, B, C)	Dutinková lišta BLW10G	1
Port napájení, komunikace	Dutinková lišta BL240G	1
Tlačítko RESET	Mikrospínač TC-0103-T	1
Mikrokontrolér	PIC16F876A-I/SP PDIL28 DIL28 MICROCHIP	1
Rezistor R1	RM 10k	1
Krystal	Krystal HC49/US QM 20.000MHZ	1
Kondenzátor C1, C2	Keramický kondenzátor CK 22p/50V NPO RM5,08 5%	2

Tab. 3 – Použité součástky pro rozšiřující desku

Součást	Katalogové jméno	Počet kusů
EEPROM	24LC256-I/P DIP8 MICROCHIP	1
Relé	Jazyčková relé COSMO RELES1A 050 000	2
Zkratovací propojka	JUMP-RT RED	5
Porty zapojení RLC a výstupů	Dutinková lišta BTK25G	1
Pull-up rezistory	RM 4k7	2
R člen (test)	RM 1k	1
C člen (test)	CK 470n/50V Z5U RM5	1
L člen (test)	Tlumivka radiální 11P-104J FASTRON	1
Propojovací piny	Oboustranný kolík S1G20 2,54mm	1

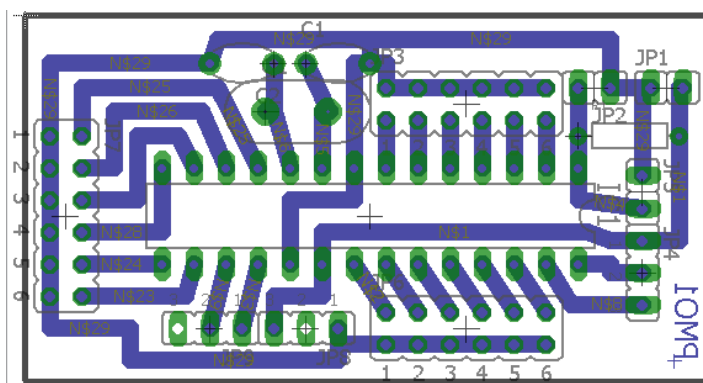
Výroba DPS

Postup výroby se pro někoho může zdát nadbytečný, proto případně doporučuji přeskočit rovnou na kapitolu 3.3, kde jsou již zobrazena schémata i reálné desky. Pro vytvoření podrobného návodu s budoucím úmyslem vzniku kopií mého modulu, je zde uveden také stručný popis výrobního procesu realizace plošných spojů.

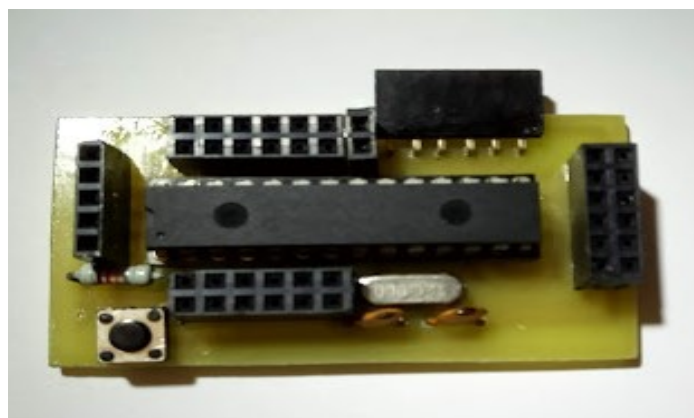
- Vložit návrh (vytisknutý na průhledný papír) přiložený k měděné straně desky pod UV lampu na 120 s.
- Ozářenou desku ponořit do vývojky, po krátké době by se měl vyvolat návrh.
- Osušit od nečistot a ořezat přebytečné hrany.
- Poté nechat desku plovat na leptadle, pro odstranění přebytečné mědi.
- Očistit lihem. Následně potřít výsledek lakem s kalafunou, kvůli zamezení oxidace mědi a zajištění pohodlnější práce při pájení.
- Vyvrtat díry na součástky, nakonec dané součástky připájet na desku.

3.3 Realizace elektronické části měřicího modulu

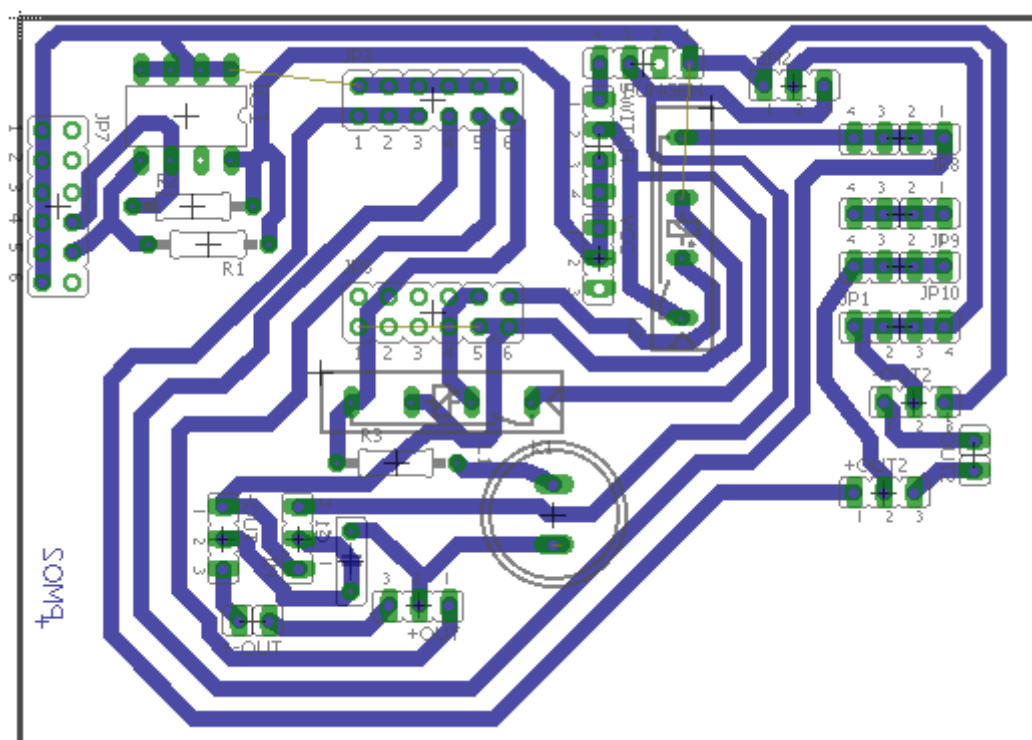
Desky plošných spojů tvoří podstatnou část měřicího modulu, ty byly vytvořeny v co nejlepším možném kompaktním provedení a na Obr. 13 se nachází ukázka návrhu DPS s mikrokontrolérem, vytvořeném v programu Eagle. Reálný výrobek lze vidět na Obr. 14 s rozměry 31 x 56 mm. Na Obr. 15 je zobrazen návrh rozšiřující desky v programu Eagle a na Obr. 16 skutečná deska o rozměrech 62 x 89 mm, která je určena k propojení RLC obvodů dle vybraného zapojení.



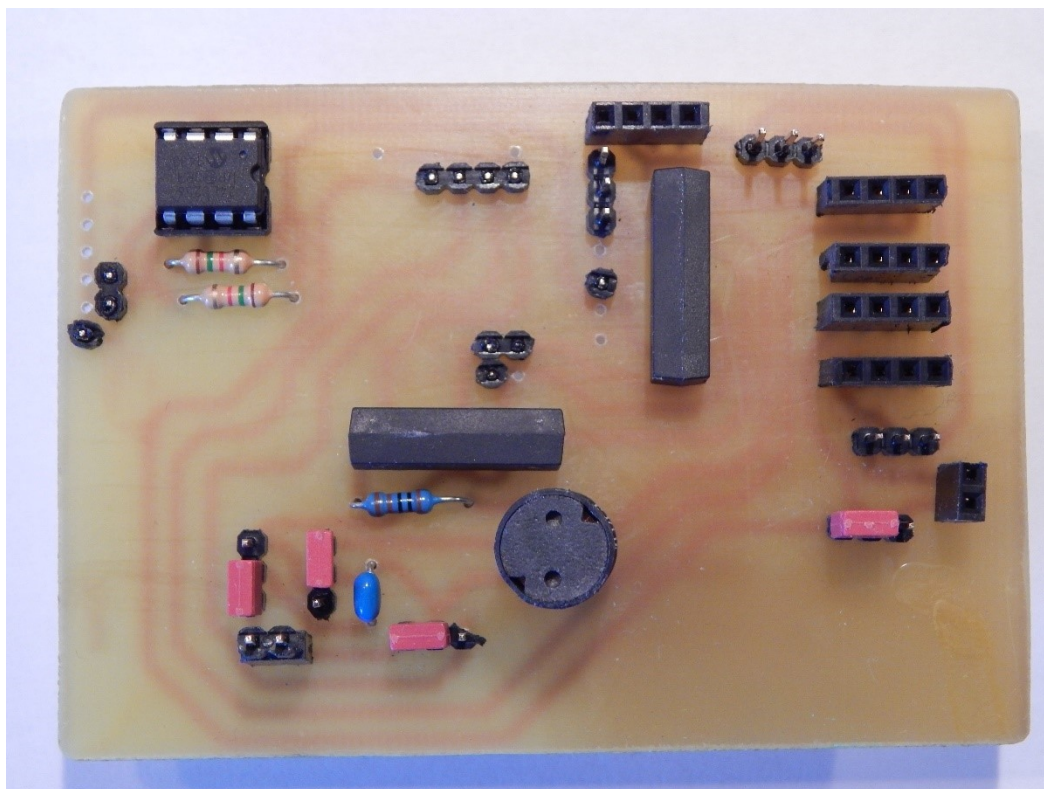
Obr. 13 – Návrh DPS pro mikrokontrolér



Obr. 14 – Reálná DPS pro mikrokontrolér



Obr. 15 – Návrh rozšiřující DPS



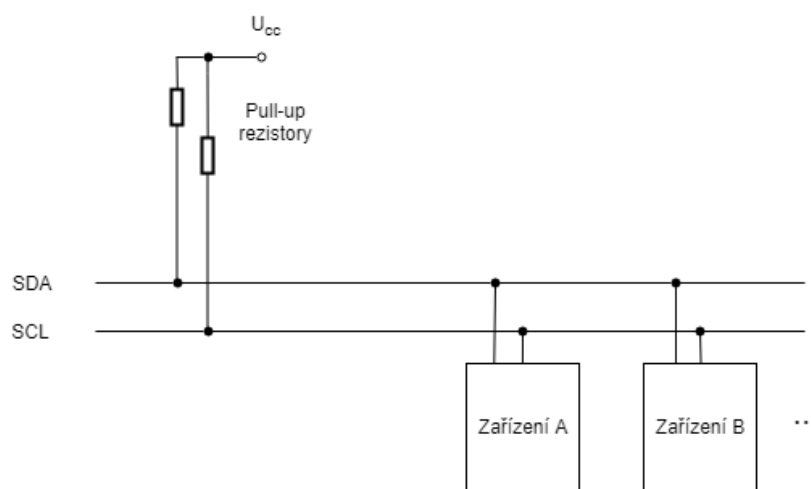
Obr. 16 – Reálná rozšiřující DPS

4 Komunikační rozhraní

Řešení realizace komunikačního rozhraní mezi počítačem a mikrokontrolérem na desce plošných spojů záviselo na modulech sériové komunikace mikrokontroléru, použitý PIC16F876A má právě dva. USART pro komunikaci s PC a I²C.

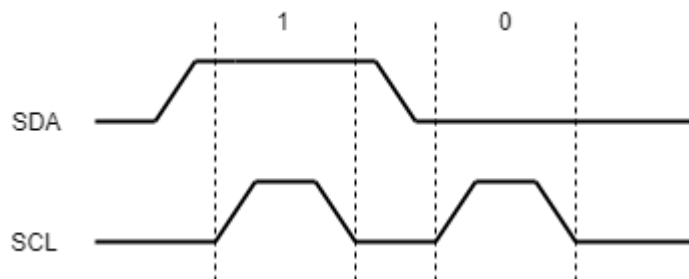
4.1 Vnitřní sériová linka

Označována I²C je sběrnice pro komunikaci mezi integrovanými obvody, která se dá zařadit mezi vnitřní sériové linky sestávající ze dvou obousměrných vodičů určenou, jak už může být z názvu patrné, pro komunikaci mezi moduly, či obvody v rámci jednoho zařízení [6].

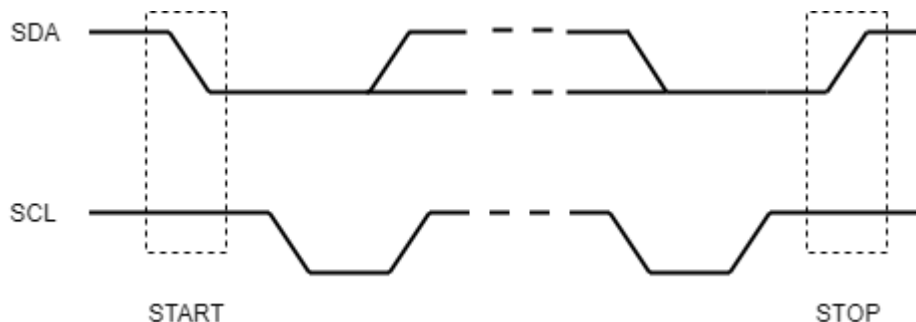


Obr. 17 – Systém propojení zařízení pomocí I²C sběrnice [6]

Pull-up rezistory, nacházející se na lince SDA (přenáší sériová data) a SCL (hodinový signál), slouží k ochraně obvodů spolu s pojištěním správné funkčnosti obousměrného provozu na těchto linkách. Právě jeden bit se přenese vždy při trvání hodinového signálu SCL. Pokud při vysoké hodnotě impulsu signálu SCL zůstane logická úroveň SDA beze změny, přenos dat proběhne v pořádku. V opačném případě se oznámí start (S) přenosu, jestliže bude přítomna sestupná hrana SDA nebo stop (P) přenosu pro náběžnou hrana SDA [6].

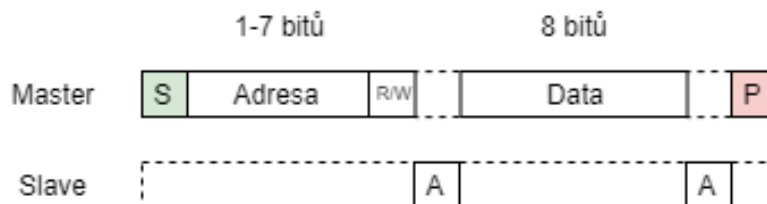


Obr. 18 – Vysílání bitů [6]



Obr. 19 – Deklarace začátku a konce přenosu [6]

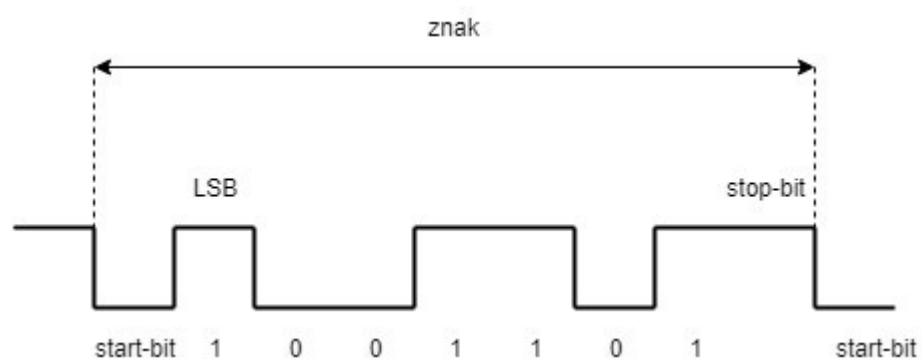
Pojem Master v I²C komunikaci označuje zařízení starající se o zahájení komunikace, ukončení komunikace, odesílání/přijímání dat, generování SCL, volbu Slave zařízení pomocí adresy (7 bitů). Na druhou stranu zařízení Slave je závislé na SCL signálu Master zařízení, potvrzuje přijetí prakticky každého datového bajtu (ACK).



Obr. 20 – Ukázka komunikace mezi Master a Slave [6]

4.2 Univerzální synchronní a asynchronní rozhraní pro přenos dat

Komunikace s PC probíhá v našem případě přes sériový port za pomoci převodníku USB – UART. Existují dva typy přenosů, synchronní (Master, Slave), či asynchronní, ten se vyskytuje právě u PC. Asynchronní přenos se skládá, ze start-bit (začátek tvoří sestupná hrana), dále pokračují datové bity (celkem osm) a jako poslední následuje stop-bit. První datový bit je nejméně významný (LSB). Při tomto typu přenosu je nutné dodržet určité parametry z důvodu nezávislosti přijímače na vysílači (bez CLK). Mezi tyto parametry patří: rychlost (baud rate: bit za sekundu), množství datových bitů, parita (stav datových bitů: bezpečnost), délka stop-bitu (čas nutný pro zpracování a posouzení správnosti přijatých dat) [6, 7].

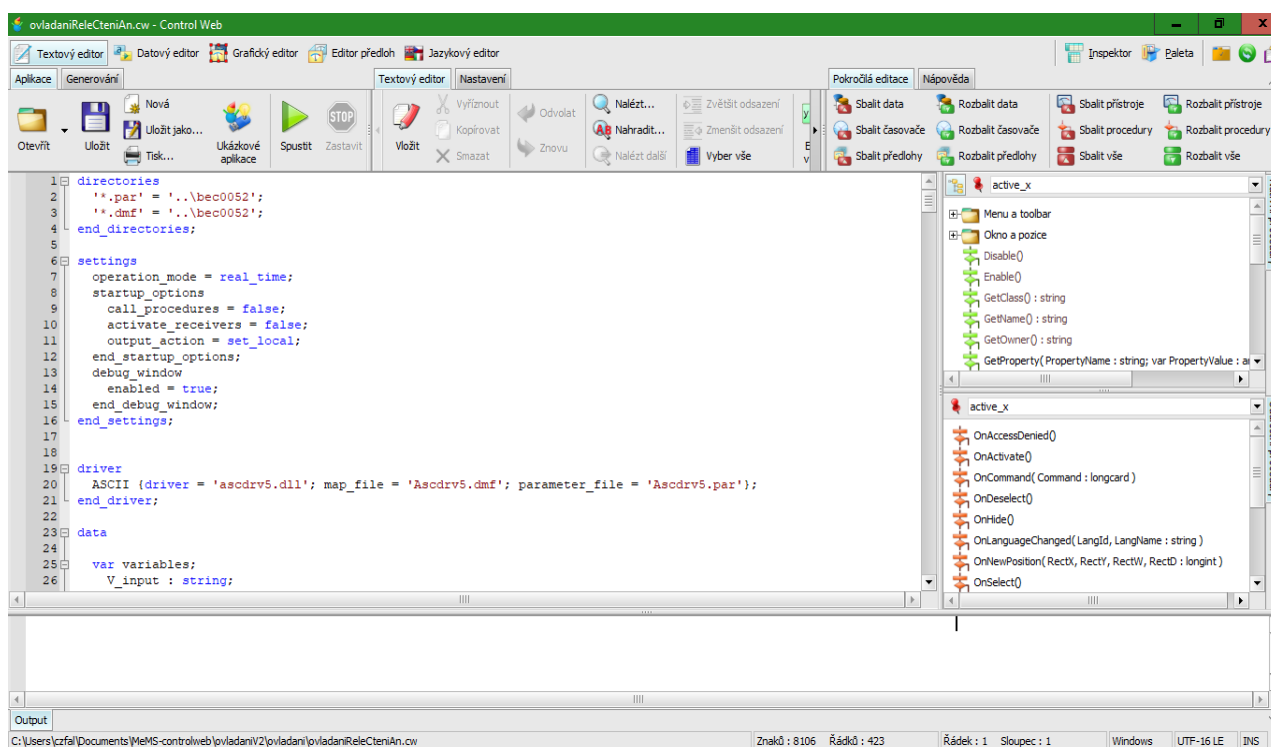


Obr. 21 – Funkce bitů u asynchronního přenosu [6]

5 Programový systém Control Web

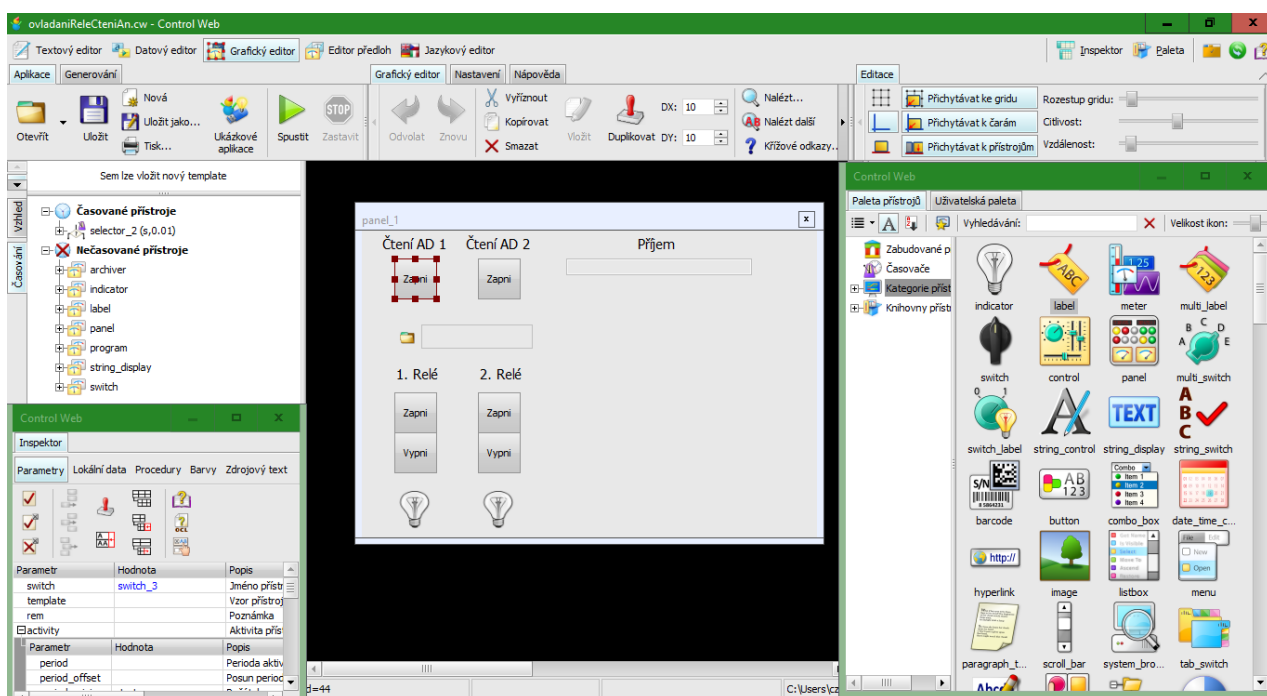
Vytvoření uživatelské aplikace bylo realizováno ve vývojovém prostředí Control Web od firmy Moravské přístroje a. s. V současné době se jedná o velmi dobrý nástroj pro takřka jakoukoliv implementaci v průmyslu (např. SCADA systémy). Od správy technologických procesů, přes vizualizace s případnou možností sběru dat, vyhodnocování obrazu z kamer, až po interakci s HTTP servery. Nejnovější verze programu s pořadovým číslem 8, je nyní zcela zdarma, tudíž si ji kdokoli může stáhnout a vyvíjet vlastní programová řešení s reálnou aplikací. Dokáže také spojit dohromady systémy, které by na první pohled vypadaly neslučitelně [8].

Jednou z částí programu Control Web je textový editor, v němž je programátor schopen upravit nebo i přidat libovolný prvek bez použití nástrojů k tomu určených. Takový postup není nejlepší. Pokud totiž použijeme zbylé dvě části programu, tzn. grafický editor a datový editor, k doplnění nového přístroje, panelu atd., automaticky se vygeneruje kód rovnou do textového editoru.



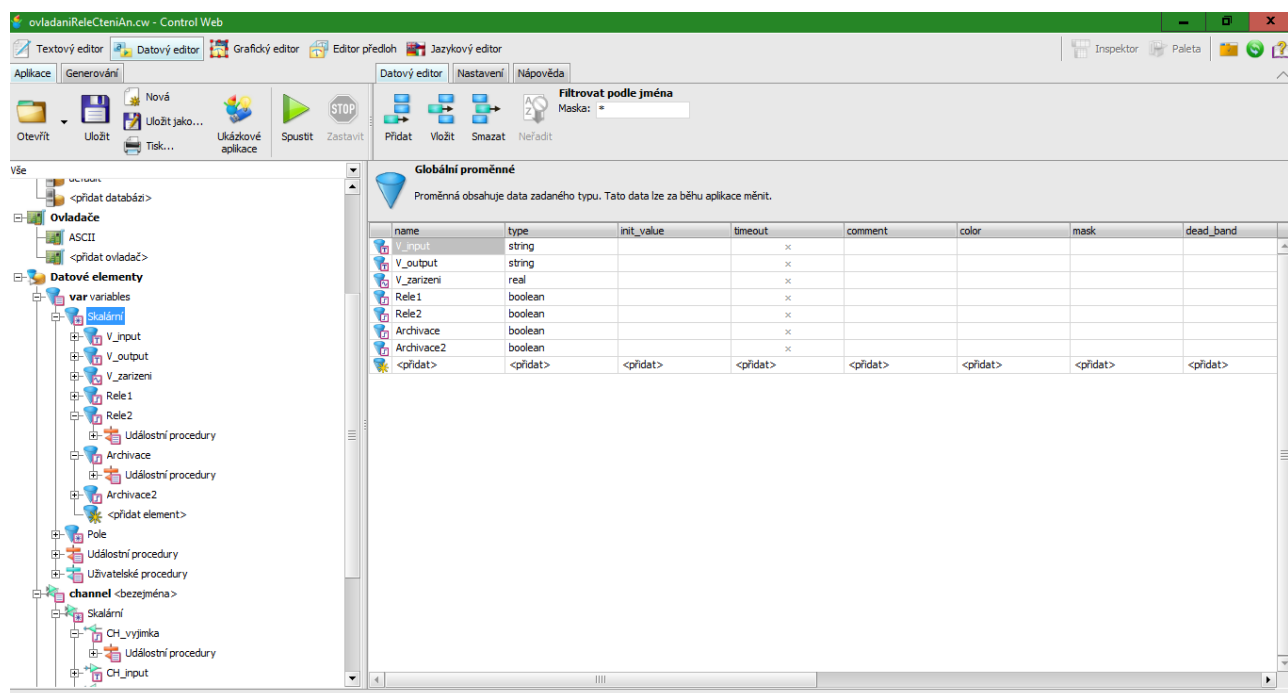
Obr. 22 – Textový editor programu Control Web

Grafický editor patří mezi součásti utvářející podobu uživatelské aplikace. Pracovní plocha dává prostor všem přístrojům, oknům, tlačítkům apod., které uživatel přidává do aplikace, k tomu je určená paleta přístrojů (stačí pouze danou věc přetáhnout ven). Pro úpravu jakéhokoliv prvku daného objektu stačí otevřít inspektor nebo provést dvojité kliknutí levým tlačítkem myši na zvoleném objektu, pak se zobrazí samostatné okno se všemi vlastnostmi objektu. Na levé straně obrazovky jsou přístroje rozdělené na časové (řízené určitou periodou aktivace) a nečasové, mezi nimi jsou i přístroje jako program spolu s časovačem, které na pracovní ploše nejsou viditelné.



Obr. 23 – Grafický editor programu Control Web

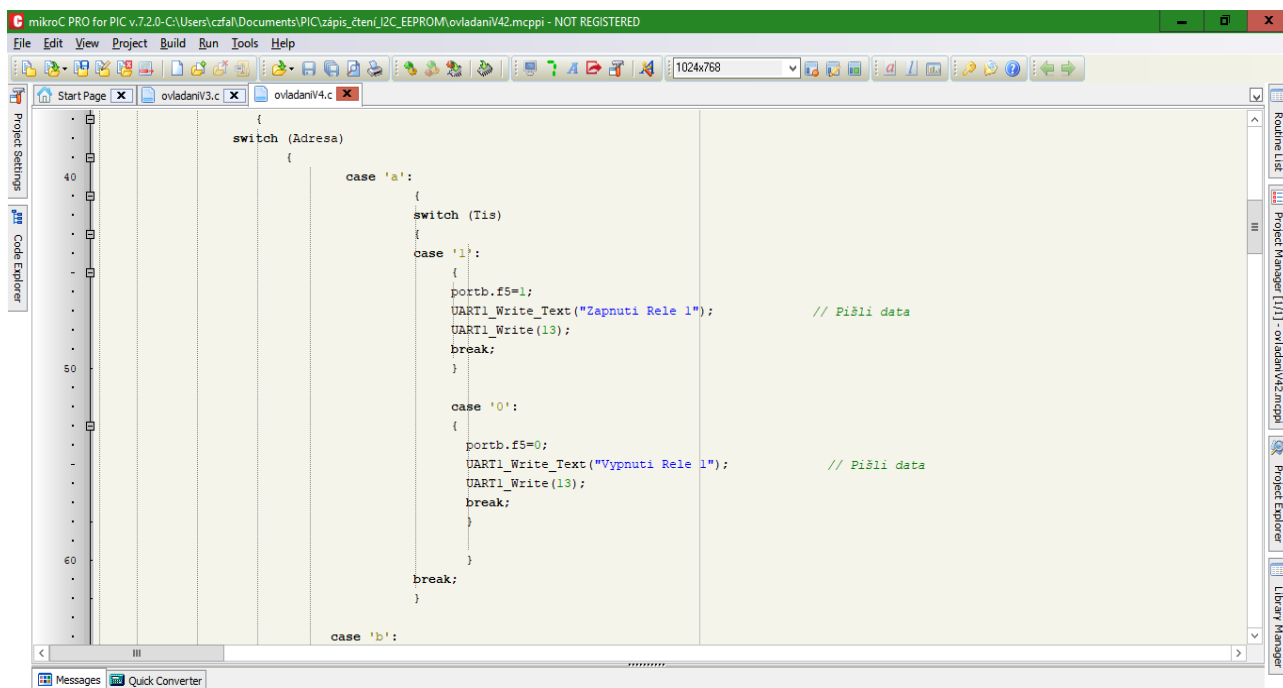
Datový editor (Obr. 24) slouží pro vytvoření a následné nastavení typu proměnných, jejich počátečních hodnot nebo vložení komentáře atd. s umožněním kontroly nad veškerými datovými elementy, komunikačními kanály, ovladači, databázemi aj. U ovladačů lze provést v parametrickém souboru změnu baud rate, parity, komunikačního portu, velikost stop-bitu atd.



Obr. 24 – Datový editor programu Control Web

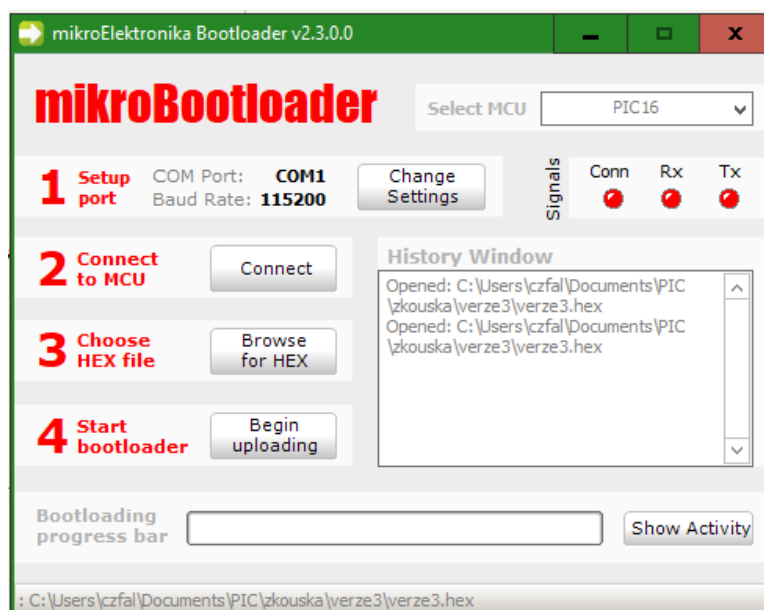
6 Software MikroC PRO for PIC

Softwarové prostředí MikroC PRO for PIC bylo využito pro implementaci zdrojových kódů do mikrokontroléru. MikroC PRO for PIC je volně dostupný ze stránek firmy Mikroelektronika D. O. O., pouze s omezením velikosti souboru předávaného mikrokontroléru. Toto omezení v mém případě nehrálo žádnou roli, protože soubor zdaleka nedosahoval limitující velikosti. Navržený zdrojový kód byl napsán programovacím jazykem C a zajišťuje funkci sériové komunikace spolu s přenosem dat, přes které se následně ovládá RLC obvod.



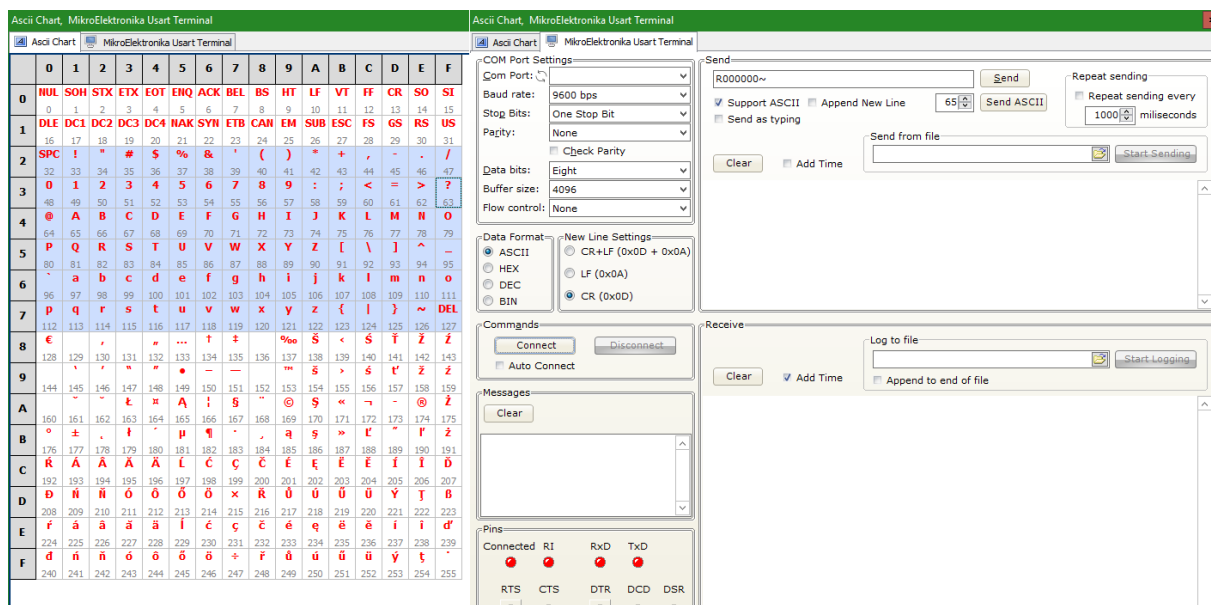
Obr. 25 – Ukázka programového rozhraní MikroC PRO

Pro nahrání kódu do mikrokontroléru je zde nástroj mikroBootloader. Nastavením správného portu a baud rate, následnému připojení k MCU tlačítkem **Connect** a volbou konkrétního HEX souboru s programovým kódem použitím tlačítka **Browse for HEX**, proběhne po stisku tlačítka **Begin uploading** přenos programu do paměti mikrokontroléru. Průběh lze pozorovat na ukazateli **Bootloading progress bar**. Po skončení přenosu nástroj vyzve zobrazením okna k resetu mikrokontroléru.



Obr. 26 – Nástroj mikroBootloader

Zmíněny musí být také další praktické nástroje, které byly při práci v programu MikroC PRO for PIC hojně využívány. MikroElektronika Usart Terminal slouží k nastavení komunikace s PC přes sériovou linku, pomocí kterého je možné testovat chování programového kódu v mikrokontroléru přímo z vývojového prostředí. Výhodou nástroje Ascii Chart pro programátora je rychlé zjištění neznámého znaku.



Obr. 27 – Nástroje Ascii Chart a Usart Terminal

7 Funkce mikrokontroléru a uživatelská aplikace

Aby bylo možné ovládat z uživatelské aplikace periferie modulu pro sestavení RLC obvodu, byl nejdříve navržen algoritmus mikrokontroléru s takovými funkcemi, jaké byly nutné pro správný chod měření, získání potřebných dat a bezproblémovou interakci uživatele s aplikací.

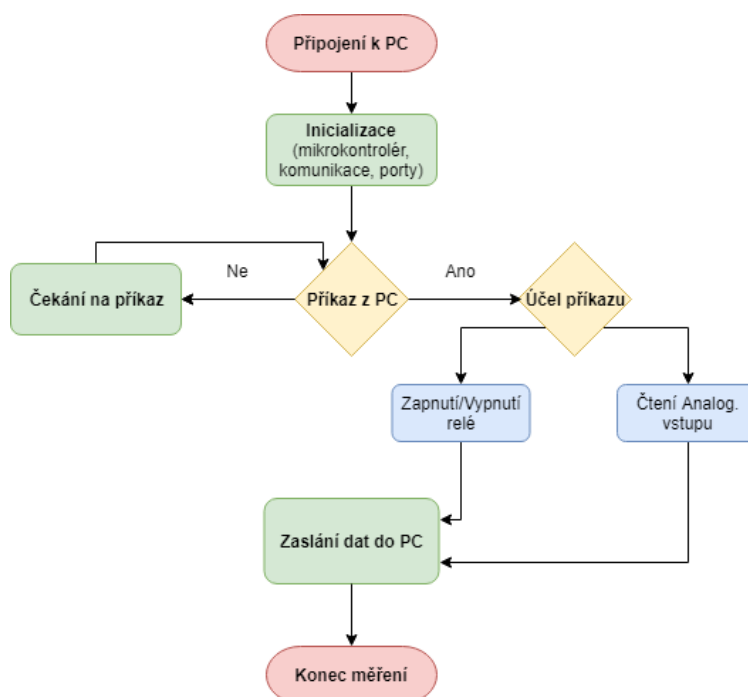
7.1 Algoritmus

Samotné programování probíhalo v kompilátoru MikroC PRO for PIC popisovaném již výše v kapitole 6. Před psaním hlavní funkce je nezbytné deklarovat určité části funkcí spolu s proměnnými. Mezi ně patří zajisté inicializace řídicí jednotky, konfigurace využívaných bran s A/D převodníkem, velikost bufferu, způsob zasílání a přijímání instrukcí apod.

V hlavní funkci main se jako první provedou inicializace řídicí jednotky (baud rate, adresa atd.), UART (počet bitů, start + stop bit, parita), poté se resetují hodnoty portů (kvůli jejich ochraně před poškozením) společně s nastavením příslušných portů dle potřeby, buď na vstupní nebo výstupní. Nyní mikrokontrolér vyčkává na přijetí dat, po jejich příjmu a kontrole se spustí příslušná nekonečná smyčka, ovládání relé, čtení analogového vstupu atd.

```
switch (Zarizeni)
{
    case 'A':
    {
        Vstup = ADC_Read(2)>>2;    // Read AD
        IntToStr(Vstup, OutPole);
        PrevodZpet(0);
        Vstup = ADC_Read(3)>>2;    // Read AD
        PrevodZpet(1);
    }
}
```

Obr. 28 – Ukázka části kódu pro čtení dat z analogových vstupů



Obr. 29 – Vývojový diagram programu

7.2 Měření v uživatelské aplikaci

Ze všeho nejdříve musí student před reálným měřením úlohy zadany RLC obvod zpracovat dle kapitoly 1. Takto připravený RLC obvod zapojí podle schématu na připravené kontaktní pole. Zkontroluje připojení modulu k PC, pokud je vše v pořádku spustí aplikaci. Na funkčním generátoru otočným knoflíkem nastaví generování požadované frekvence.

Po nastavení hodnoty frekvence pak student provede v uživatelské aplikaci kliknutí levým tlačítkem myši na spínač pod označením **1. Relé** s textem **Zapni**, čímž se sepne relé s cílem předávat na vstup měřicího modelu sinusový signál z funkčního generátoru. Zároveň se v aplikaci rozsvítí indikace v podobě žárovky po celou dobu sepnutí. Nyní, když prochází harmonický signál měřeným, obvodem stačí stisknout tlačítko s textem **Zapni** pod označením **čtení AD 1** ke spuštění čtení vstupního a výstupního signálu přivedeného na piny A/D převodníku. Po zapsání vzorků se čtení automaticky ukončí a v poli příjem se objeví text „**Konec čtení AD 1**“. Výsledná data jsou pak uložena do souboru MereniFCH (datum čas) DBF. Import uloženého datového souboru je nakonec možný do programu Excel nebo programu MATLAB, který je graficky i výpočetně schopnější. Tlačítka na pravé straně aplikace ovládají pevně daný RLC obvod určený

k testování funkčnosti desky, student tedy využívá levou stranu aplikace, která ovládá druhý obvod zapojený studentem.



Obr. 30 – Aplikace při prvotním zapnutí

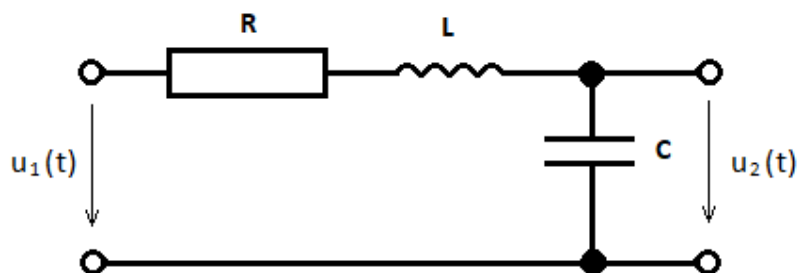


Obr. 31 – Aplikace po skončení měření

Aplikace byla navržena s důrazem na jednoduchost a přehlednost pro uživatele.

7.3 Testování měřícího modulu

Na vytvořeném modulu je možné měřit libovolná zapojení součástek odporu, cívky a kondenzátoru, jak sériově, tak i paralelně. Pro ověření funkčnosti modulu jako celku probíhalo měření na RLC obvodu uvedeném níže (viz Obr. 32). Hodnoty pasivních prvků jsou zvoleny tak, aby po rozboru obvodu, který je podrobně popsán v kapitole 1.4, byla zlomová frekvence $f_z \cong 107,3 \text{ Hz}$, tedy $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 22 \text{ }\mu\text{F}$, $L = 100 \text{ mH}$.

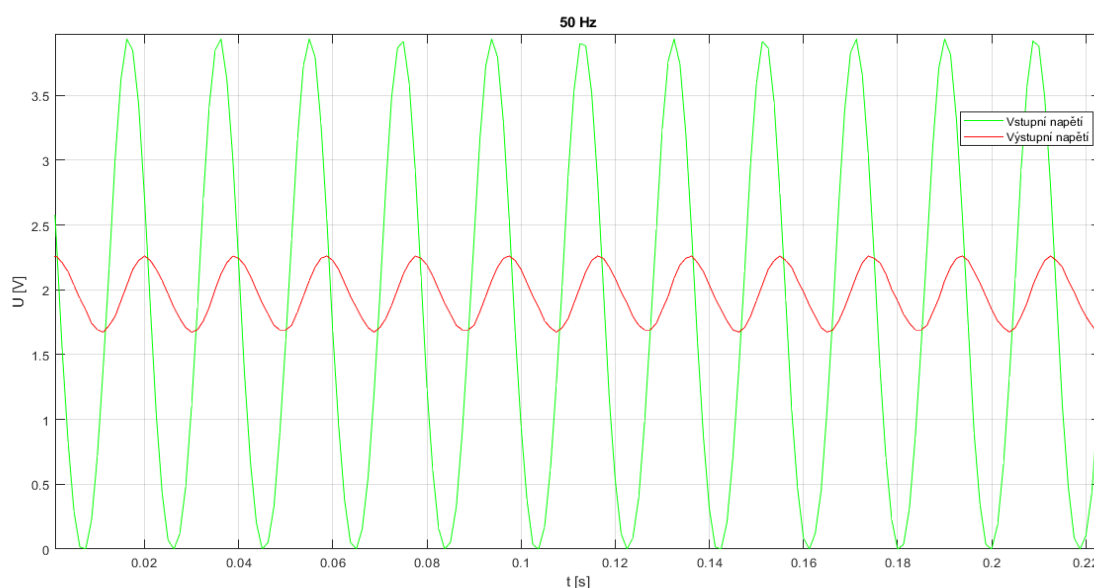


Obr. 32 – Schéma zapojení testovaného RLC obvodu

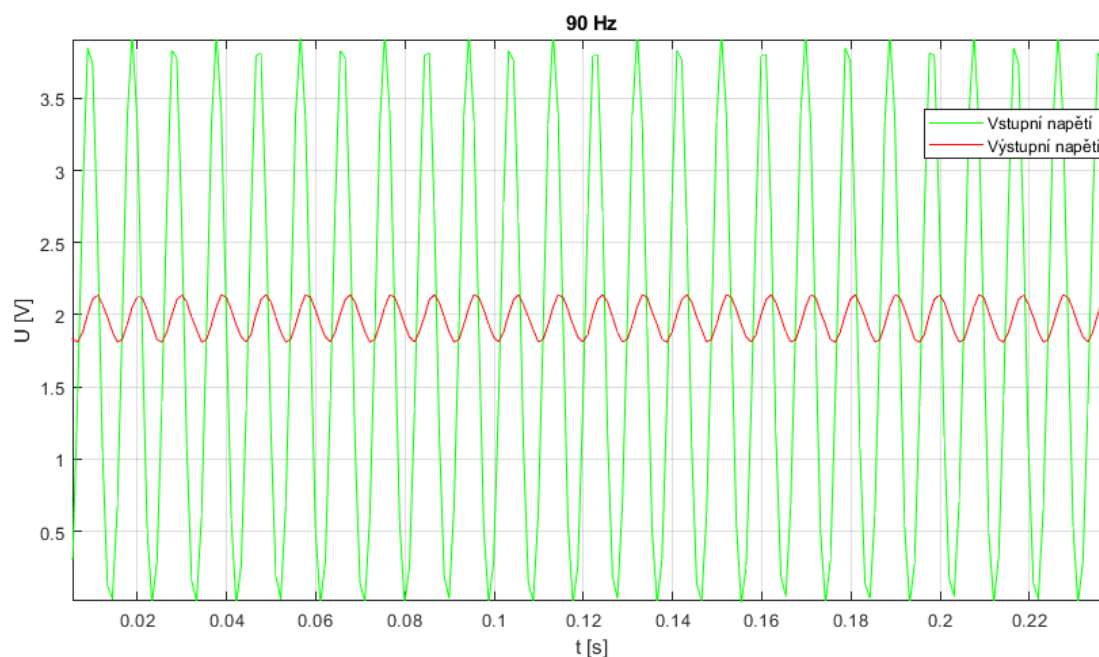
Naměřená data vstupního i výstupního harmonického signálu při frekvenci 50 Hz jsou zobrazena na grafu 2. Z těchto dat můžeme usuzovat, že při sedmnácti vzorcích na periodu je vzorkování na úrovni přibližně 1 ms. Následující frekvence blíží se zlomové je 90 Hz, amplituda výstupního signálu se oproti 50 Hz zmenšila. Další měřenou frekvencí bylo 130 Hz, se sedmi vzorky na periodu už se dostává na hranici možností vyhodnocení naměřených dat. Z důvodu zápisu, jak vstupního, tak výstupního kanálu současně je maximální frekvence dané úlohy značně omezena.

Doporučuje se tedy upravit hodnoty pasivních součástek vybrané úlohy tak, aby hodnota zlomové frekvence měla přibližně 10 Hz, například změnou kondenzátoru $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 2200 \text{ }\mu\text{F}$, $L = 100 \text{ mH}$ nebo obou prvků současně, jelikož právě jejich kombinace ovlivňuje časovou konstantu T_0 .

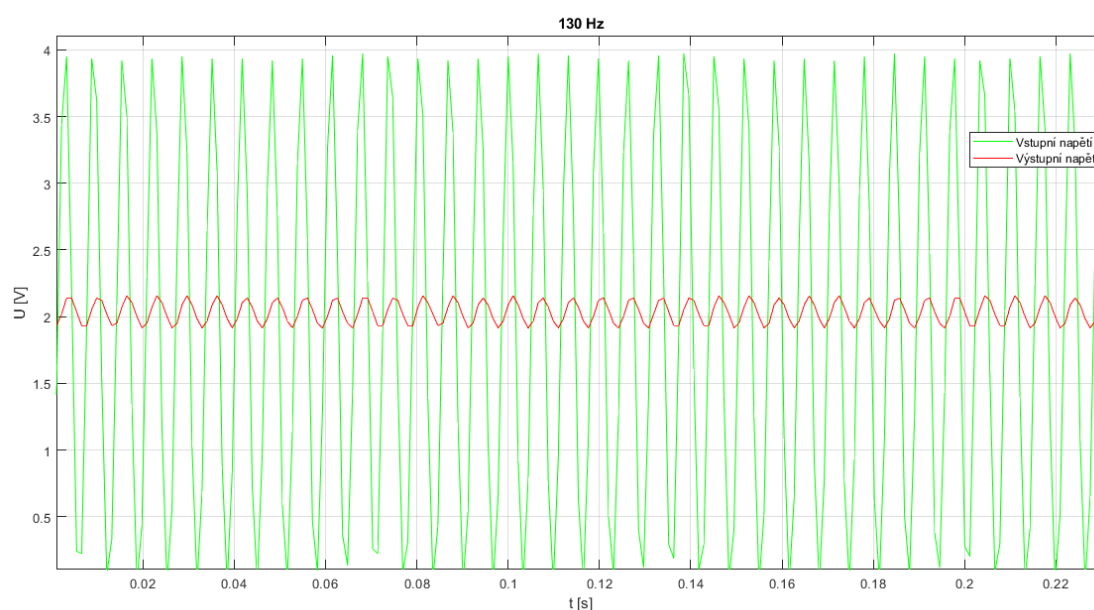
Minimální rozsah, který umožňuje provést měření dle doporučení výše uvedené zlomové frekvence, je v rozsahu úhlového kmitočtu v okolí zlomové frekvence o jednu dekádu nižší a jednu dekádu vyšší, kvůli zobrazení změny fáze, tedy od 1 do 100 Hz minimálně.



Graf 2 – Výsledné naměřené hodnoty při 50 Hz



Graf 3 – Výsledné naměřené hodnoty při 90 Hz



Graf 4 – Výsledné naměřené hodnoty při 130 Hz

Příklady naměřených dat pro frekvence 50, 90 a 130 Hz z realizovaného měřícího modulu RLC obvodu jsou zobrazeny na grafech označených Graf 2 až Graf 4. Zelenou barvou je označen harmonický signál vstupního napětí, kdežto červenou barvou je označen harmonický signál výstupního napětí.

8 Závěr

Cílem bakalářské práce byla tvorba laboratorního modulu, který bude určen k sestavení daného typu RLC obvodu s možností měřit kmitočtové charakteristiky. Dosud měli studenti ve výuce k dispozici stavebnici RC Didactic, která se nachází v laboratoři, kde její dostupnost není vždy stoprocentní. Také se jedná prakticky o jediné provedení stavebnice, což vůbec není postačující. Předpokladem do budoucnosti je využití prototypu navrženého laboratorního modulu k měření kmitočtových charakteristik RLC obvodů, s případnou výrobou jeho kopií.

V první fázi řešení své práce jsem se seznámil s průběhem stávajícího měření na stavebnici RC Didactic, spolu s typy úloh RLC obvodů. Podrobné postupy těchto úloh a jejich analytickou část identifikace jsem uvedl na začátku této práce. Jde tedy o popis sady zapojení RLC obvodů, které studenti v rámci výuky identifikují měřením kmitočtových charakteristik, dále zjišťují základní parametry tohoto měření a ve výsledku pro řadu frekvencí vstupního harmonického signálu studenti obdrží body kmitočtových charakteristik.

Druhá kapitola popisuje rozbor nástrojů, propojení dílčích modulů a vlastní průběh měření se stavebnicí RC Didactic. Tyto kroky byly nezbytné pro samotný návrh laboratorního modelu.

Vlastním přínosem byla realizace desek plošných spojů společně s jejich návrhem. Nejprve byla vytvořena deska pro hlavní měřicí modul s mikrokontrolérem a následně přídatná deska zajišťující připojení libovolného RLC obvodu s možností zapojení konkrétních pasivních elektronických součástek. Kapitola tři pojednává o manuálním návodu výroby desek plošných spojů, včetně seznamu konkrétních součástek a prvků, pro jejich bezproblémové vytvoření ve větším množství kusů.

Seznámením se s principy sériové komunikace přenosu dat mezi mikrokontrolérem a počítačem jsem implementoval komunikační protokol k jejímu zprovoznění. Z dostupných programů jsem si zvolil volně stažitelný MicroC PRO for PIC. V tomto pro mne novém prostředí jsem v jazyce C sestavil potřebné funkce řídicího algoritmu, zajišťující správný chod laboratorního modulu.

Realizace návrhu laboratorního modulu byla velice obtížná. Mimo řešení nových problematických částí, jako např. s ukládáním dat do původně testované externí paměti, jsem měl za úkol vytvořit jednoduchou aplikaci pro koncové uživatele, která by měla ukládat data do souboru k následnému vyhodnocení v programu MATLAB a ovládat čtení

vstupů/výstupů RLC obvodu. Uživatelská aplikace vznikala v programovém prostředí Control Web, ten byl vybrán z důvodu spolehlivosti, velké škály nástrojů a částečné znalosti v rámci studia. Zacházení s aplikací je blíže popsáno v sedmé kapitole.

Poslední fází bylo testování možností laboratorního modulu, zhodnocení jeho kvality a omezení při předpokládaných měřeních frekvenčních charakteristik RLC obvodu. Ověřování modulu probíhalo již v průběhu tvorby dílčích částí, které jsem musel zprovoznit. V závěru jsem sledoval kvalitu získaných odezev RLC obvodu na vstupní harmonický signál. Omezením v mém případě byla vzorkovací perioda 1 ms a z toho vyplývající maximální možná frekvence měření, určené ve výši 130 Hz.

V případě, že by rozsah frekvencí nebyl dostačující, pak by bylo nutné zvolit místo stávajícího mikrokontroléru jiný typ mikropočítače a zlepšit tak kvalitu zápisu dat. Další možností je připojení jiného média k ukládání dat např. SD karty. Programování a aplikace vyšších řad mikroprocesorů je nad rámec rozsahu této práce, tudíž zde lze nalézt motivaci pro případnou navazující odbornou práci.

Seznam použité literatury

- [1] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
- [2] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. *Základy automatické regulace*. Dotisk 2. vyd. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-1924-2.
- [3] RC SPOLEČNOST S.R.O přístroje pro vědu a vzdělání. *Výukový systém rc2000 Moduly* [online]. 2013 [cit. 2019-02-12]. Dostupný z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebeb11.pdf
- [4] TESAŘ, Zdeněk a Iva PETŘÍKOVÁ. *Základy elektroniky, součástky a obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3628-7.
- [5] MATOUŠEK, David. *C pro mikrokontroléry PIC: práce s PIC18F452 a PIC18F1220 v jazyce C*. Praha: BEN – technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-413-2.
- [6] MATOUŠEK, David. *Udělejte si z PC--: měření, řízení a regulace pomocí sériového portu PC a sběrnice I2C*. 1. díl, Generátor, čítač, převodník, programátor... Praha: BEN – technická literatura, 2001. PC & elektronika. ISBN 80-7300-036-9.
- [7] GOFTON, Peter W. *Sériová komunikace*. Přeložil Bohumil KVAPIL. Praha: Grada, 1995. ISBN 80-7169-131-3.
- [8] MORAVSKÉ PŘÍSTROJE A.S. *Moravské přístroje* [online]. 2010 [cit. 2019-04-20]. Dostupný z: <http://www.mii.cz/>
- [9] WZATEK, Petr. *Programový modul pro laboratorní model ventilátoru*. Ostrava: Katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2017. Bakalářská práce, vedoucí: Škutová, J.
- [10] KEESMAN, J. Karel *System identification: an introduction*. New York: Springer, 2011. Advanced textbooks in control and signal processing. ISBN 978-0-85729-521-7.
- [11] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PIC16F87XA Data Sheet* [online]. 2003 [cit. 2019-01-05]. Dostupný z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>